

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Análise do consumo de energia no edifício da biblioteca de
Rio Maior: simulação, desempenho energético e medidas de
melhoria**

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Catarina Daniela Costa Guerreiro

Dissertação orientada por:
Prof.^a Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva (IST)
Prof.^a Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão (FCUL)

2016

“In order to suceceed, we must first believe that we can.”

Níkos Kazantzákis

Agradecimentos

A realização deste trabalho, apenas foi possível devido à colaboração de um grupo de pessoas a quem não poderia deixar de prestar o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, às professoras Cristina Matos Silva e Marta Oliveira Panão por todo o acompanhamento, disponibilidade e dedicação ao longo de todos estes meses.

O meu muito obrigado também à Camera Municipal de Rio Maior e aos Engenheiros Ricardo Rosário e Pedro Miguel. Ao Guilherme Ruivo e à Doutora Carla Barata da Biblioteca Municipal Laureano Santos por toda a disponibilidade e apoio prestado na recolha de toda a informação necessária ao desenvolvimento desta dissertação.

Um grande agradecimento aos meus amigos Francisco Carvalho e Raquel Almeida, por estarem sempre lá para me ajudar a ultrapassar determinados obstáculos e dúvidas ao longo do trabalho. Maria Bettencourt e Rita Mira, companheiras de biblioteca, obrigada a vocês também. Joana Horta obrigada pelo incentivo eficaz ao longo de todo o processo.

A todos os amigos de Rio Maior e áqueles com quem tive o prazer de partilhar estes 5 anos de percurso académico, o meu muito obrigada pelos ensinamentos, pelos momentos de amizade e companheirismo, e por de certa forma terem contribuído para que seja a pessoa que sou hoje.

Por ultimo, o maior e mais merecido agradecimento é direccionado aos meus pais. Um muito obrigado por toda a paciência, incentivo, e compreensão não só nesta ultima fase, mas ao longo de todo o meu percurso académico. Sem vocês não seria possível.

Obrigado.

Resumo

Este estudo visa analisar o consumo de energia do edifício da Biblioteca Municipal Laureano Santos em Rio Maior. De modo a obter os valores de consumo energético, procedeu-se à recolha dos dados de faturação energética referente ao ano de 2014. No entanto, para obter a desagregação de consumo de energia recorreu-se à simulação dinâmica com recurso ao software EnergyPlus. O levantamento dos dados necessários à caracterização do edifício permitiu a construção do modelo que foi depois calibrado com recurso à faturação energética. Este modelo permitiu que se efectuasse a desagregação dos consumos de energia final com 41% da energia consumida pelos equipamentos, 32% pela iluminação e 28% pela climatização (apenas para aquecimento). Seguidamente foi aplicado o Regulamento Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) e determinada a classe energética do edifício. O edifício foi classificado como pertencente à classe B. O passo seguinte passou pela aplicação de medidas de melhoria que permitissem aumentar o seu desempenho energético. A primeira medida passou pela aplicação de coberturas verdes em 85% da cobertura existente no edifício, utilizando um modelo de simulação computacional de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008) e aplicado ao EnergyPlus. No entanto, a aplicação desta medida resultou em melhorias pouco significativas, com uma diminuição máxima de cerca de 1% no consumo de energia final, no caso das coberturas semi-intensivas. A segunda medida passou pela aplicação de um sistema de energia solar fotovoltaica, e neste caso, a instalação de 16.2 kWp permitiu a alteração da classe do edifício para A.

Posteriormente foi feita uma análise mais detalhada à aplicação destes dois sistemas às condições reais de funcionamento do edifício. Para o sistema de coberturas verdes, em condições reais, deu-se uma redução no consumo de energia para aquecimento de 5.9% para coberturas extensivas e de 5.5% para coberturas semi-intensivas. Como no edifício não existe consumo de energia associado ao arrefecimento ambiente, analisaram-se as temperaturas no interior do espaço para várias soluções de cobertura: extensiva, semi-intensiva e clara (existente). Provou-se que a cobertura semi-intensiva é a mais benéfica pois conduz a temperaturas do ar interior inferiores às restantes soluções. Uma análise económica simplificada a estas coberturas estima um tempo médio de retorno de investimento de cerca de 42 anos. Quanto à aplicação de um sistema de produção de energia solar nestas condições, foram avaliados três sistemas: 11.5 kWp; 13.75 kWp e 17.5 kWp. O sistema de 17.5 kWp revelou-se o mais proveitoso uma vez que tem a capacidade de suprir 46.6% das necessidades de energia eléctrica do edifício apresentando um tempo de retorno do investimento inferior aos restantes sistemas, 5.56 anos.

Palavras-Chave: Simulação dinâmica, Classe energética, EnergyPlus, Cobertura Verde, Solar Fotovoltaico, Redução da Fatura Energética

Abstract

The present study aims to analyze the energy consumption in Biblioteca Municipal Laureano Santos in Rio Maior. The energy consumption values were collected with respect to the energy turnover of the previous year, 2014. However, in order to obtain a breakdown of energy consumption, there was the need to resort to dynamic simulation using EnergyPlus software. The survey of data required to characterize the building made it possible to make the model that was then calibrated with resource to the energy turnover. Later, using this model, a disaggregation of consumptions was made and the results revealed that currently 41% of the final energy is consumed by the equipment, 32% by the illumination and 28% in HVAC (only for heating). Subsequently, the Regulamento Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) was applied and the building energy class was determined. The building was classified as belonging to Class B, so the next step was to apply improvement measures that would increase the building's energy performance. The first measure taken was the application of green roofs on 85% of the existing coverage of the building, using a computer simulation model of green roofs developed by Sailor and applied to EnergyPlus which enables the definition of the various parameters that alter the response from the building. However, the use of this measure resulted in no significant improvement, with a maximum decrease of about 1% in the final energy consumption, in the case of semi-intensive coverage. The second measure taken was the application of a solar photovoltaic system, and in this case, the installation of 16.2 kWp allowed for the class of the building to change to class A.

Following this, a detailed analysis was performed on the application of these two systems on the real parameters of the building. The green roof system, using real parameters, resulted in a reduction in energy consumption through heating of 5.9% in the extensive coverage, and 5.5% for the semi-intensive coverage. As there is no information regarding cooling, a temperature analysis was performed on the various types of coverage: extensive, semi-intensive and cool roof (currently utilised). It was proven that the semi-intensive coverage was the most beneficial as it presented interior temperatures inferior to the others. A relatively superficial economic analysis to these coverages determined a medium recovery time of investment of around 42 years. As to the application of a solar energy production system within these conditions, three systems were evaluated: 11.5 kWp, 13.75 kWp and 17,5 kWp. The 17.5 kWp system was revealed to be the most advantageous as it had the capacity to suppress 46.6% of the electrical energy needs of the building, presenting an investment-return period inferior to the rest, 5.56 years.

Keywords: Dinamic simulation, Energy class, EnergyPlus, Green Roof, Solar photovoltaic,

Índice

Resumo.....	i
Abstract	iii
Índice	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	ix
Acrónimos.....	xi
1. Introdução	1
1.1 Relevância do tema	1
1.2 Motivação e objetivos do trabalho	2
1.3 Organização do trabalho.....	2
2. A energia nos edifícios.....	5
2.1. Edifícios de comércio e serviços	5
2.2. Balanço energético nos edifícios.....	6
3. Regulamentação térmica dos edifícios	9
3.1. Enquadramento.....	9
3.2. Regulamento do desempenho energético de edifícios de comércio e serviços	9
4. Simulação computacional	13
4.1. Simulação dinâmica computacional.....	13
4.2. EnergyPlus	13
5. Integração de sistemas de redução de consumos e produção de energia em edifícios.....	15
5.1. Coberturas verdes.....	15
5.1.1. Sistema Construtivo	15
5.1.2. Tipologias de coberturas verdes	17
5.1.2.1. Cobertura extensiva.....	17
5.1.2.2. Cobertura intensiva.....	18
5.1.2.3. Cobertura semi-intensiva.....	19
5.1.3. Vantagens e desvantagens.....	19
5.1.3.1. Vantagens estéticas e de utilização	19
5.1.3.2. Vantagens ambientais.....	19
5.1.3.3. Vantagens económicas	21
5.1.4. Dimensionamento de um sistema de coberturas verdes	22
5.1.4.1. O modelo de Sailor.....	22
5.1.4.2. Aplicabilidade do modelo em EnergyPlus	23
5.2. Energia Solar Fotovoltaica	26
5.2.1. Sistema solar fotovoltaico	27
5.2.2. Considerações para a instalação	28
5.2.3. Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico.....	29

6.	Caso de Estudo	31
6.1.	Recolha de informação	31
6.2.	Nota histórica	31
6.3.	Descrição do edifício.....	32
7.	Metodologia	35
7.1.	Processos de análise	35
7.2.	Modelação do modelo real	35
7.3.	Modelação dos modelos previsto e de referência.....	39
7.4.	Método de análise do modelo de coberturas verdes.....	39
7.4.1.	Condições climáticas do local	41
7.4.1.1.	Temperatura e radiação	41
7.4.1.2.	Precipitação	42
7.5.	Método de análise do potencial fotovoltaico do local.....	43
8.	Análise de consumos	47
8.1.	Calibração do modelo de simulação real e caracterização dos seus consumos	47
8.2.	Análise de consumos em condições previstas e de referência	49
8.3.	Classe energética	50
8.4.	Medidas de Melhoria.....	50
8.4.1.	Coberturas Verdes	50
8.4.2.	Solar Fotovoltaico	52
9.	Análise aos benefícios da implementação de medidas de redução de consumo e produção de energia no caso de estudo.....	55
9.1.	Sistema de coberturas verdes	55
9.1.1.	Análise de desempenho no modelo real	55
9.1.2.	Avaliação do desempenho de diferentes soluções de cobertura.....	56
9.1.3.	Análise económica	63
9.2.	Sistema Fotovoltaico	65
9.2.1.	Análise de desempenho em modelo real	65
9.2.2.	Análise económica – Sistema de produção fotovoltaica	68
10.	Conclusão e Desenvolvimentos Futuros	71
	Referências Bibliográficas	73
	Sítios da Internet	74
	Anexos.....	77
	Anexo A – Descrição do modelo de Sailor (2008)	77
	Anexo B – Características da envolvente do edifício da BMLS	84
	Anexo C – Produção e consumo fotovoltaico.....	91

Índice de Figuras

Figura 1 – Percentagem de consumo por total a) de energia final por sector de actividade; b) de electricidade por sector de actividade. Adaptado de (DGEG 2015)	1
Figura 2- Consumo de energia final no sector dos edificios - 2010 (Building Energy Efficiency Policies 2015).....	5
Figura 3 - Divisão percentual do uso total de energia final em edificios não residenciais segundo cada tipologia (Breu et al. 2008)	5
Figura 4 – Ganhos e perdas de energia dentro de um compartimento (Arquitectologia s.d.)	6
Figura 5 -Correspondência entre o valor de R_{IEE} e a respectiva classe energética, em edificios de comércio e serviços	11
Figura 6 – Exemplo coberturas ajardinadas: Edificio da Escola de artes Design e Media da NanYoung Technological University em Singapura (à esquerda); Habitações em Norðragøta, Faroe Islands (à direita) (Neoturf 2015)	15
Figura 7 – Esquema ilustrativo das várias camadas que compõem uma cobertura verde. Adaptado de (Growing Green Guide s.d.).....	16
Figura 8 - Pormenor construtivo de uma cobertura jardim extensiva (Ferreira 2013)	18
Figura 9 - Pormenor construtivo de coberturas de jardim intensivas (Ferreira 2013).....	18
Figura 10 – Relação entre a abundância vegetativa e a temperatura associada a cada local, na cidade de Nova York. Imagens obtidas com recurso a imagens de satélite em infravermelho (Earth Observatory 2006).....	20
Figura 11 – Fluxos de energia de uma cobertura ajardinada, adaptado de (Sailor 2008)	22
Figura 12 – Interface EnergyPlus, representação do menu e respectivos campos referentes às coberturas verdes	24
Figura 13 – Evolução e segmentação da potência fotovoltaica instalada Portugal (Geologia 2014).....	26
Figura 14-Variação do preço médio mensal de módulos fotovoltaicos para diferentes tipos de tecnologia (Renewable & Agency 2015)	27
Figura 15 - Interface PVGIS	29
Figura 16 – Vista frontal da Biblioteca Municipal Laureano Santos	32
Figura 17 - Vista aérea da cidade Rio Maior com destaque para a localização da BMLS (Bling Maps 2015)	32
Figura 18 - Vista interior de zonas integrantes da BMLS: secção infantil (no topo), sala dos adultos (em baixo)	33
Figura 19 – Esquema ilustrativo da metodologia adoptada para análise de consumos do edificio..	35
Figura 20 – Planta da BMLS e respectiva divisão em zonas térmicas	36
Figura 21- Esquema ilustrativo de um compartimento em sobrepressão, adaptado de (America et al. 2015)	38
Figura 22 – Camadas construtivas de uma cobertura verde: a) estrutura tradicional, b) tidas em conta na simulação (Rakotondramiarana et al. 2015).....	40
Figura 23 – Temperatura exterior máxima, mínima e média para um ano típico na cidade de Rio Maior	41
Figura 24 – Radiação solar média e máxima para um ano típico na cidade de Rio Maior.	42
Figura 25 – Dados médios de precipitação para a cidade de Rio Maior	42
Figura 26 - Esquema ilustrativo dos ângulos necessários à determinação da percentagem de sombreamento	43
Figura 27 - Interface SolTerm para obtenção das obstruções radiativas.....	44
Figura 28 - Modelo geométrico do edificio da BMLS: a) vista frontal; b) vista traseira	47
Figura 29 - Comparação entre consumos anuais reais e simulados de gás natural	48
Figura 30 - Comparação entre consumos anuais reais e simulados de electricidade	48
Figura 31 - Desagregação do consumo anual de energia final	48
Figura 32 - Comparação do consumo anual de energia final para os três modelos em estudo (real, previsto e de referência)	49
Figura 33 – Área de cobertura disponível para aplicação de cobertura jardim	50

Figura 34 - Comparação entre consumos de energia para climatização no modelo previsto, com e sem coberturas verdes.	51
Figura 35 – Comparação entre consumos de energia final para climatização no modelo previsto, com e sem a aplicação de coberturas verdes	52
Figura 36 - Identificação e delimitação da área de cobertura disponível para a implementação do sistema fotovoltaico. Vista aérea do edifício.....	53
Figura 37 - Disposição dos módulos fotovoltaicos	53
Figura 38 – Comparação entre o consumo mensal de energia eléctrica no modelo real, com e sem a aplicação de coberturas ajardinadas	55
Figura 39 - Comparação entre o consumo anual de gás natural no modelo real, com e sem a aplicação de coberturas ajardinadas	56
Figura 40 – Dia mais frio: Temperatura da folhagem e do solo das coberturas extensiva e semi-intensiva, temperatura ambiente e temperatura superficial exterior da cobertura clara	58
Figura 41 – Dia mais frio: Temperatura interior da zona mediante a aplicação das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara.....	58
Figura 42 – Dia mais frio: Temperatura superficial exterior das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara	58
Figura 43 – Dia mais quente: Temperatura da folhagem e do solo das coberturas extensiva e semi-intensiva, temperatura ambiente e temperatura superficial exterior da cobertura clara	59
Figura 44 – Dia mais quente: Temperatura interior da zona mediante a aplicação das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara.....	59
Figura 45 – Dia mais quente: Temperatura superficial exterior das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara.....	59
Figura 46 – Dia de maior intensidade radiativa: Temperatura da folhagem e do solo das coberturas extensiva e semi-intensiva, temperatura ambiente e temperatura superficial exterior da cobertura clara.....	60
Figura 47 – Dia de maior intensidade radiativa: Temperatura interior da zona mediante a aplicação das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara.....	60
Figura 48 – Dia de maior intensidade radiativa: Temperatura superficial exterior das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara.....	60
Figura 49 – Diagrama de carga eléctrico dos quatro dias típicos correspondentes a cada uma das estações do ano.....	65
Figura 50 - Distribuição dos painéis fotovoltaicos para o sistema de 17.5 kWp	66
Figura 51 – Consumo típico, necessidade final de energia, excedente e autoconsumo de energia após a instalação de um sistema de 17.5 kWp em cada uma das quatro estações.....	67
Figura 52 - Planta original do edifício da Biblioteca Municipal Laureano Santos	84
Figura 53 - Consumo típico, necessidade final de energia, excedente e autoconsumo de energia após a instalação de um sistema de 11.5 kWp em cada uma das quatro estações.	91
Figura 54 - - Consumo típico, necessidade final de energia, excedente e autoconsumo de energia após a instalação de um sistema de 13.75 kWp em cada uma das quatro estações.....	92

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Caracterização dos consumos do tipo S e tipo T segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços (Emprego 2013)	10
Tabela 2 - Comparação entre as três principais tipologias de coberturas verdes. Adaptado de (IGRA 2015)	17
Tabela 3 – Descrição e gama valores utilizáveis para cada um dos parâmetros de cálculo de coberturas verdes	25
Tabela 4- Eficiências dos módulos solares associadas a cada tipo de tecnologia (Cerón et al. 2013)	28
Tabela 5 – Potência associada aos equipamentos elétricos	37
Tabela 6- Classificação de desempenho de referência dos diferentes sistemas segundo o RECS ...	39
Tabela 7 – Densidade de Potência de iluminação para cada zona do edifício.	39
Tabela 8 - Parâmetros introduzidos no EnergyPlus	40
Tabela 9 – Principais características referentes ao módulo fotovoltaico utilizado (Renewables S.A. 2014)	43
Tabela 10 – Custos associados aos componentes do sistema fotovoltaico	45
Tabela 11 – Indicadores de eficiência energética e respetiva classe energética obtida.....	50
Tabela 12 – Camadas construtivas referentes à cobertura clara em estudo.....	57
Tabela 13 – Características construtivas da camada exterior referente à cobertura clara em questão	57
Tabela 14 - Dia mais frio: Temperaturas médias nas camadas construtivas durante o período de funcionamento do edifício.....	61
Tabela 15 - Dia mais quente: Temperaturas médias nas camadas construtivas durante o período de funcionamento do edifício.....	61
Tabela 16 – Variação do consumo de energia entre diferentes soluções de cobertura e espessuras de isolamento (Cristina et al. 2014)	62
Tabela 17 – Parâmetros utilizados determinação da viabilidade económica da implementação de coberturas verdes.....	64
Tabela 18 – Comparação dos principais valores entre casos de estudo	68
Tabela 19 – Componentes, quantidades e custos associados aos componentes que compõem o sistema de 17.5 kWp	69
Tabela 20 - Componentes, quantidades e custos associados aos componentes que compõem o sistema de 13.75 kWp	70
Tabela 21 - Componentes, quantidades e custos associados aos componentes que compõem o sistema de 11.5 kWp	70

Acrónimos

IEE	Índice de Eficiência Energética
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
RCCTE	Reglamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
IEE	Indicador de Eficiência Energética
DEO	<i>United States Department of Energy</i>
IDF	<i>Input Data File</i>
DAC	Desenho Assistido por Computador
IGRA	<i>International Green Roof Association</i>
CABE	<i>Commission for Architecture and the Built Environment</i>
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographic Information System</i>
BMLS	Biblioteca Municipal Dr. Laureano Santos
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
RPH	Renovações por hora
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua

1. Introdução

1.1 Relevância do tema

Em 2007, cerca de 50% da população mundial vivia já em cidades, marcando o momento em que pela primeira vez na história os seres humanos se tornaram uma espécie urbana (Madlener & Sunak 2011). 3200 Milhões segundo o Wordwatch Institute (World Watch Institute 2013). Em Portugal entre 1950 e 2000 a população residente em áreas urbanas aumentou em 49%, passando de 19 para 68% da população total (Gonçalves & Actual 2010). Atualmente, embora as cidades cubram apenas 2% da superfície da terra são quem gera a maior parte das emissões de carbono e as responsáveis por cerca de 75% dos recursos consumidos (Madlener & Sunak 2011).

Este aumento do número de pessoas a migrar para os centros urbanos cria a necessidade de opções e soluções rápidas para habitação. Os locais mais procurados são muitas vezes as habitações com baixas rendas onde a urbanização é desordenada, já bastante antiga e/ou pouco eficiente, o que se traduz em consumos elevados de energia. Os principais motivos para o aumento do consumo de energia no sector dos edifícios, são as necessidades de aquecimento e arrefecimento (e de todos os equipamentos associados como bombas de calor, ventiladores, caldeira etc), bem como as necessidades de energia para iluminação.

Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO₂ na Europa, e as previsões apontam para um aumento do consumo de energia neste sector (European Commission s.d.).

Em Portugal, o consumo associado aos edifícios representa 30% dos consumos energéticos e 60% do consumo elétrico, sendo o segundo sector em termos de contribuição para as emissões de CO₂ (Gonçalves & Actual 2010) tal como é evidenciado na Figura 1.

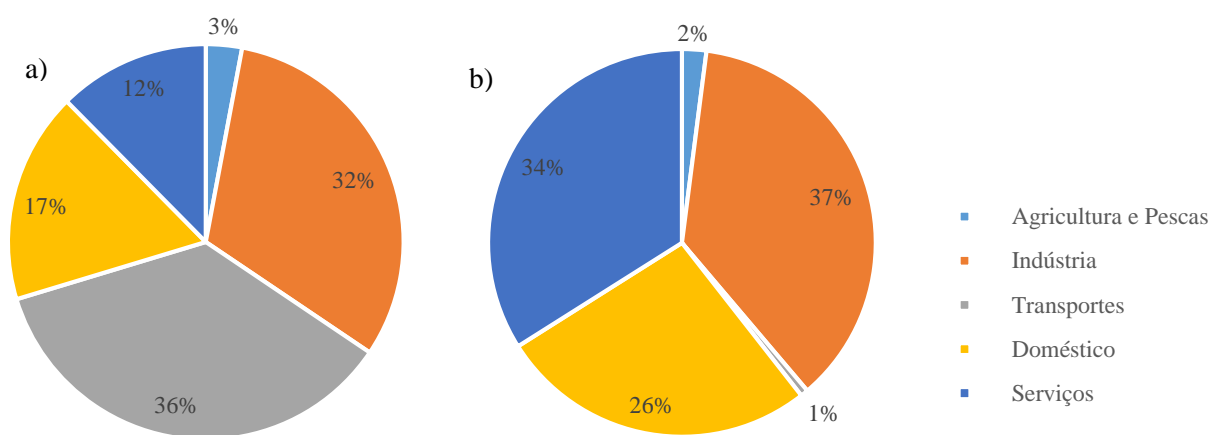


Figura 1 – Percentagem de consumo por total a) de energia final por sector de actividade; b) de electricidade por sector de actividade. Adaptado de (DGEG 2015)

Atualmente, cerca de 35% dos edifícios na Europa têm mais de 50 anos. Aumentando as medidas de eficiência energética nos edifícios, seria possível reduzir o seu consumo em 5 a 6% bem como diminuir as emissões de CO₂ em cerca de 5% (European Commission s.d.).

A racionalização do consumo de energia e a utilização de energia proveniente de fontes renováveis neste sector constituem importantes medidas para reduzir a dependência energética e as emissões de CO₂ (Sousa 2012).

1.2 Motivação e objetivos do trabalho

O elevado consumo associado ao sector dos edifícios traz relevância ao estudo de medidas que promovam a redução de consumos, aumentando os níveis de eficiência energética. Para tal, é necessário aferir e avaliar de que forma é atualmente usada a energia através da recolha de dados e recorrendo a variados métodos e técnicas de simulação. Através da utilização dessas técnicas é possível determinar possíveis ineficiências e perceber de que forma se poderá promover o desempenho energético dos mesmos.

Em meio urbano, mesmo em cidades de menor dimensão, é necessário que se altere a forma como se encaram não só hábitos de consumo mas também os métodos de produção de energia, através da introdução de sistemas que promovam a redução de emissões contribuindo para um desenvolvimento sustentável e assumindo um compromisso de responsabilidade com o ambiente, garantindo a sua qualidade e manutenção.

Como exemplos de sistemas perfeitamente aplicáveis em meio urbano podem enunciar-se, as chamadas coberturas verdes ainda não muito comuns em Portugal, e por outro lado, os sistemas de produção de energia renovável como é o caso da energia solar fotovoltaica que vai ganhando cada vez mais destaque. Para que se obtenha sucesso na implementação destes sistemas é necessária uma análise cuidada, que determine os ganhos energéticos e todos os possíveis impactos da sua implementação.

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação da condição energética atual do edifício da Biblioteca Municipal Laureano Santos em Rio Maior, bem como da viabilidade da implementação de um sistema de coberturas verdes e de um sistema de aproveitamento de energia solar para produção de energia. Para isso foram realizadas as seguintes tarefas:

- Recolha de informação referente ao edifício de serviços de carácter educacional em estudo;
- Construção de um modelo que permitisse a avaliação do comportamento térmico e energético do edifício, utilizando o *software* de simulação dinâmica *EnergyPlus* e a interface gráfica *Sketchup*;
- Determinação da classe energética do edifício tendo em conta a legislação em vigor;
- Aplicação de medidas de racionalização e produção de energia, cujo objetivo passa pela redução da fatura energética sem que se comprometa o nível de conforto térmico e visual;
- Viabilidade energética e económica da aplicação dessas mesmas medidas no contexto real de funcionamento do edifício.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em dez capítulos e três anexos. O primeiro capítulo diz respeito às questões introdutórias da presente dissertação, iniciando a abordagem ao tema principal e determinando quais os objetivos que se pretendem cumprir.

No segundo capítulo foi feita uma análise ao panorama energético no sector dos edifícios no que respeita à caracterização das várias tipologias existentes, bem como das trocas de energia que se dão no seu interior.

No terceiro capítulo foi feito um enquadramento da legislação portuguesa referente à certificação energética de edifícios em Portugal.

O quarto capítulo apresenta uma caracterização das várias ferramentas de simulação dinâmica existentes para uma correta simulação e avaliação de consumos energéticos com especial destaque para a ferramenta utilizada, o *EnergyPlus*.

O quinto capítulo introduz o tema das coberturas verdes, nomeadamente a definição sistema construtivo, tipologias existentes, vantagens e desvantagens das mesmas bem como do modelo base que permitiu o dimensionamento das mesmas ao longo desta dissertação. É também neste capítulo que se faz a introdução à energia solar fotovoltaica, e às técnicas de dimensionamento destes de sistemas de produção de energia.

No sexto capítulo é feita a apresentação do edifício em estudo, da sua história e do tipo de informação relevante recolhida.

O sétimo capítulo descreve detalhadamente a metodologia utilizada para a realização do presente trabalho, desde a fase inicial à fase final.

No oitavo capítulo foi feita a análise e caracterização da atual condição energética do edifício. Foram também analisados os resultados referentes à aplicabilidade de possíveis medidas de melhoria.

No nono capítulo foi feita uma nova análise à aplicabilidade de medidas de melhoria que promovam a eficiência energética, mas desta vez nas condições reais de funcionamento do edifício. Essa análise foi não só de cariz energético mas também económico.

Finalmente, o décimo capítulo é dedicado às conclusões e a possíveis desenvolvimentos futuros dentro da temática abordada.

O primeiro anexo, anexo A, faz uma descrição do modelo de Sailor (2008), nomeadamente das equações que estão na base do seu desenvolvimento. O anexo B contém dados relativos à envolvente do edifício em estudo, e o anexo C apresenta resultados de consumo e produção relativos a dois dos três tipos de sistema fotovoltaicos em estudo.

2. A energia nos edifícios

2.1. Edifícios de comércio e serviços

Dos grandes edifícios de escritórios às pequenas casas familiares, os edifícios europeus são muito variáveis quanto à sua função. A classificação mais utilizada consiste na subdivisão entre edifícios residenciais e não residenciais também designados por edifícios de comércio e serviços. Cada uma destas categorias agrega múltiplas tipologias.

Os edifícios não residenciais apresentam uma vasta diversidade em termos de tipologia quando comparados com os edifícios residenciais. São um sector muito mais complexo e heterogéneo que pode incluir escritórios, lojas, hospitais, administração pública, restaurantes, escolas, bibliotecas, universidades entre muitos outros. Segundo dados de 2010, este sector foi um dos que mais cresceu em termos de consumo de energia, como é evidenciado pela Figura 2. O aumento foi significativo quer nos edifícios residenciais como nos não residenciais. Apesar do consumo associado aos edifícios residenciais ter uma maior representatividade, no segundo o crescimento tem sido mais acentuado nos últimos anos.

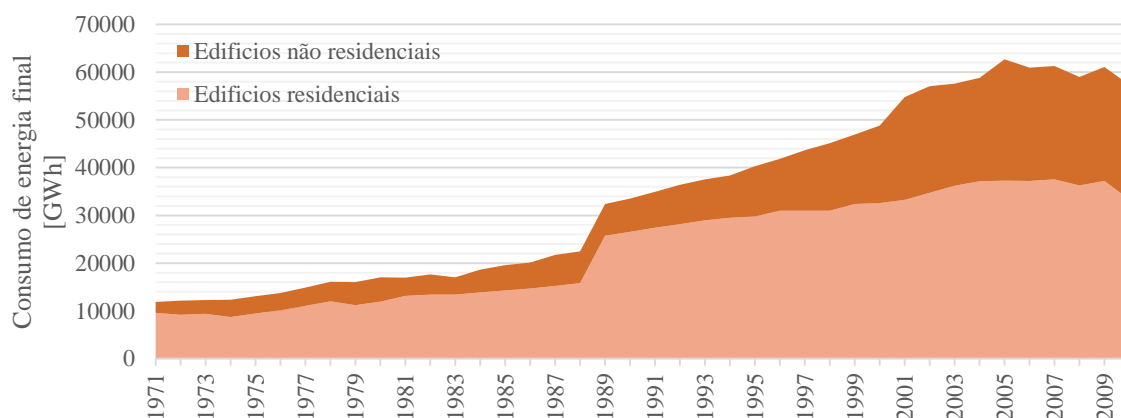


Figura 2- Consumo de energia final no sector dos edifícios - 2010 (Building Energy Efficiency Policies 2015)

Relativamente à distribuição do consumo pelas diferentes tipologias, apresenta-se na Figura 3 a distribuição do consumo de energia final pelos diferentes edifícios que compõem o sector de comércio e serviços e que, para cada tipologia, agrega os mais variados usos como a iluminação, climatização, ventilação ou os mais diversos equipamentos eléctricos.

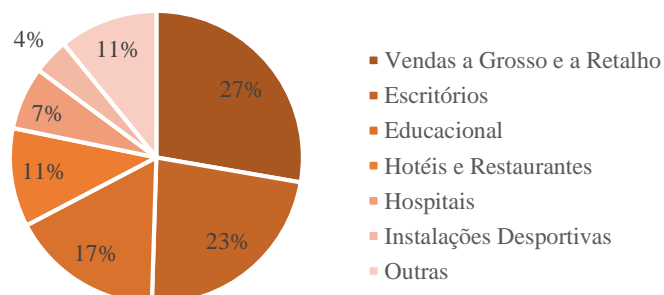


Figura 3 - Divisão percentual do uso total de energia final em edifícios não residenciais segundo cada tipologia (Breu et al. 2008)

Pode verificar-se que a tipologia com maior representatividade é a ‘vendas a grosso e a retalho’, que inclui desde centros comerciais a estações de serviço. Em segundo lugar ficam os edifícios de escritórios, sendo o terceiro lugar ocupado por edifícios ligados à educação como é o caso das escolas, universidades e bibliotecas. É nos edifícios comerciais que se centram diariamente uma grande parte dos habitantes de um país, e posto isto, estes edifícios deveriam ser o exemplo de implementação de medidas de eficiência a seguir. Consideram-se como muito representativos os edifícios da tipologia ‘educacional’, uma vez que são diariamente frequentados por pessoas de todas as faixas etárias, podendo servir quando bem conseguidos, como edifícios exemplo com impacto na consciencialização da sociedade. É portanto clara, a necessidade de reavaliar os gastos energéticos nestes edifícios pensando em formas de incrementar a eficiência energética dos nossos edifícios.

2.2. Balanço energético nos edifícios

É fundamental que se proceda a uma revisão dos principais fenómenos implícitos ao estudo do comportamento térmico dos edifícios, antes de se iniciar a análise dos temas que se pretendem desenvolver ao longo desta dissertação.

Nos últimos anos assistiu-se a um aumento da exigência nos padrões de conforto térmico devido a um maior desenvolvimento económico e social. Torna-se, por isso, cada vez mais importante, o estudo pormenorizado do balanço energético de um edifício, no que diz respeito às perdas e ganhos térmicos que ocorrem através da sua envolvente, numa tentativa de tornar mais fiáveis os métodos de previsão das necessidades de energia para a climatização. Estas necessidades são influenciadas por diversos fatores que podem ir desde as condições meteorológicas, elementos existentes na construção, perfis de ocupação e utilização, bem como o rendimento dos sistemas de iluminação e climatização. Na Figura 4 pode-se observar um esquema geral das trocas que ocorrem entre o exterior e o interior de um compartimento.

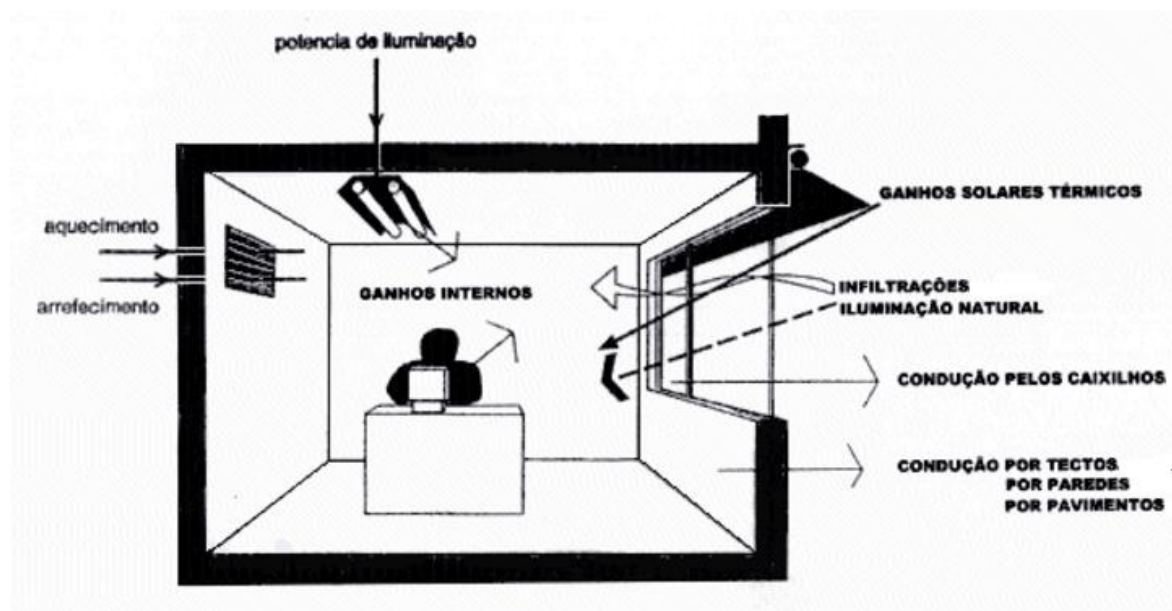


Figura 4 – Ganhos e perdas de energia dentro de um compartimento (Arquitecologia s.d.)

No balanço térmico de um edifício consideram-se os ganhos internos (G_i) relativos à ocupação, equipamentos e iluminação; os ganhos solares (G_s) que variam consoante a incidência da radiação solar nas superfícies opacas e não opacas; os ganhos de ventilação (G_v) que correspondem aos ganhos/perdas devido à entrada de ar do exterior, resultado de infiltrações ou ventilação; e ganhos de climatização (G_c) que representam a energia que o sistema fornece/extrai ao espaço.

A Equação 1 expressa o balanço entre ganhos e perdas com base na conservação de energia dentro de um compartimento, efetuada em regime do ar interior a temperatura constante:

$$G_{is} + G_s + G_v + G_c = \rho \times c_p \times Vol_c \times \frac{\partial T_i}{\partial t} + \sum_{n=1}^k A_n \times U_n \times (T_i - T_{sn}) \quad [1]$$

Os ganhos solares pelos vãos envidraçados podem ser aproximados com recurso à seguinte equação:

$$G_s = A_v \times F_s \times (R_d \times \cos(\text{altitude}) \times \cos(\text{azimute}) + R_{df}) \quad [2]$$

onde A_v corresponde à área da superfície não opaca (m^2) e F_s é o fator solar (adimensional), R_d a radiação direta e R_{df} radiação difusa (W/m^2), altitude e azimute ($^\circ$).

Os ganhos de ventilação e climatização são calculados com recurso às seguintes equações:

$$G_v = \rho \times c_p \times \dot{V} \times (T_e - T_i) \quad [3]$$

$$G_c = \rho \times c_p \times \dot{V} \times (T_{ins} - T_i) \quad [4]$$

com ρ e c_p a massa volúmica (kg/m^3) e o calor específico ($J/(kg/K)$) respetivamente, e \dot{V} o caudal volúmico de ventilação (m^3/s), T_e a temperatura do ar exterior ($^\circ C$), T_{ins} a temperatura do ar insuflado pelo sistema de climatização ($^\circ C$). Na Equação 1 importa ainda definir, ∂t a variação temporal, Vol_c o volume do fluido (m^3), A_n a área da superfície n (m^2) e U_n o coeficiente de transmissão térmica da superfície n ($W/(m^2.K)$) (Albuquerque 2014).

A segunda parte da equação 1 contabiliza a energia do ar interior do espaço e a energia transferida pela sua envolvente onde, ρ representa a massa volúmica do fluido (kg/m^3) e c_p o calor específico ($J/(kg/K)$), Vol_c é o volume do compartimento, T_i a sua temperatura interior (considerando o ar perfeitamente misturado), T_{sn} a temperatura da superfície “ n ” que tem área “ A_n ” e condutância entre o ar interior e essa superfície “ U_n ” (Albuquerque 2014).

Este balanço simples permite assim que seja feita a contabilização das trocas existentes entre o interior e o exterior do espaço e determina qual a sua influência nas necessidades finais de energia, possibilitando a escolha e o dimensionamento dos sistemas de climatização mais adequados a cada situação.

3. Regulamentação térmica dos edifícios

3.1. Enquadramento

Há um enorme potencial de diminuição de consumos de energia no sector Residencial e de Serviços para o mesmo ou para um melhor nível de desempenho. No entanto, a eficiência energética é uma “evidência” que muitas vezes não é óbvia. Houve portanto a necessidade de criação de normas e regulamentos quer a nível nacional quer internacional para que se comece a mudar o paradigma existente.

A Diretiva n.º 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, EPDB (*Energy Performance of Buildings Directive*) estabeleceu exigências térmicas e de desempenho energético para edifícios novos e existentes sujeitos a grande renovação e promoveu a obrigatoriedade de implementação aos diversos estados membros de um sistema de certificação energética de forma a informar os cidadãos sobre a qualidade térmica dos seus edifícios, fossem eles privados ou públicos, para construção, venda ou arrendamento. A transposição desta diretiva, conduziu a nível nacional, à criação do Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) e à revogação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE – Decreto-lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro) e do Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE – Decreto-lei n.º 188/98 de 7 de Maio) através da publicação do Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, do Decreto-Lei n.º 79/06 e do Decreto-Lei n.º 80/2006, todos de 4 de Abril (IteCons s.d.).

A Diretiva Europeia 2010/31/UE de 19 de Maio de 2010 relativa a EPBD vem reformular as medidas importantes para a redução da dependência energética da União Europeia e das emissões de gases com efeito de estufa, estabelecendo novas metas para aperfeiçoar o desempenho energético dos edifícios, através do fornecimento de um quadro geral e comum para o cálculo desse desempenho, cujas metodologias devem ser expressamente seguidas. Como consequência procedeu-se à revisão do Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril que dita o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Esta revisão resultou na publicação do Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto que revoga os anteriores SCE, RCCTE e RSECE. O novo regulamento engloba, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (IteCons s.d.).

3.2. Regulamento do desempenho energético de edifícios de comércio e serviços

O Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de Agosto aprovou a Portaria nº349-D/2013 como o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços.

O desempenho energético de um edifício de comércio e serviços é determinado com recurso ao seu indicador de eficiência energética (IEE), que é determinado tendo por base o somatório anual dos consumos dos diferentes tipos de energia, agrupados em indicadores parciais e expressos em unidades de energia primária.

Numa primeira fase, o objetivo deste indicador é a categorização dos diferentes consumos existentes em consumos do tipo S, T e Ren. Os consumos de energia a considerar para os tipos S e T são os descritos na Tabela 1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, já os consumos Ren são determinados com base na produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes renováveis e apenas destinada a autoconsumo ou passível de ser utilizada no edifício.

Tabela 1 – Caracterização dos consumos do tipo S e tipo T segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços (Emprego 2013)

IEE_S	IEE_T
Aquecimento e arrefecimento ambiente, incluindo humidificação e desumidificação	Ventilação e bombagem não associada ao controlo de carga térmica
Ventilação e bombagem em sistemas de climatização	Equipamentos de frio
Aquecimento de águas sanitárias e de piscinas	Iluminação dedicada e de utilização pontual
Iluminação interior	Elevadores, escadas e tapetes rolantes (até 31 de Dezembro de 2015)
Elevadores, escadas e tapetes rolantes (a partir de 1 de Janeiro de 2016)	Iluminação exterior (até 31 de Dezembro de 2015)
Iluminação exterior (a partir de 1 de Janeiro de 2016)	Todos os restantes equipamentos e sistemas não incluídos em IEE _S

Mas nem todos os consumos são contabilizados para a certificação energética do edifício. Os consumos do tipo S são efetivamente contabilizados no cálculo, bem como os consumos do tipo Ren quando existem. Os consumos do tipo T por outro lado não são contabilizados para esse efeito, eles apenas são usados na determinação do IEE global que serve como termo de comparação entre edifícios.

Numa segunda fase a legislação prevê a avaliação do desempenho do edifício segundo diferentes condições, criando três tipos de indicadores de eficiência energética (Emprego 2013):

- IEE Previsto, IEE_{pr}: o qual procura traduzir o consumo anual de energia do edifício com base na localização do edifício, nas características da envolvente, na eficiência dos sistemas técnicos e nos perfis de utilização previstos para o edifício;
- IEE Efetivo, IEE_{ef}: o qual traduz o consumo anual de energia do edifício, obtido com base no histórico de faturas de energia ou considerando os resultados de uma avaliação energética efetuada numa base de tempo anual;
- IEE Referência, IEE_{ref}: o qual procura traduzir o consumo anual do edifício caso este fosse dotado de soluções de referência para alguns dos elementos da envolvente e para alguns dos sistemas técnicos, mantendo inalteradas as demais características do edifício.

É importante que fique clara a sequência de processos definida pelo regulamento. Primeiramente é feita a modelação do edifício segundo as suas condições reais procedendo-se de seguida à validação do modelo implementado por comparação com as faturas energéticas. Seguidamente, procede-se à simulação em condições previstas de funcionamento e ao cálculo do respetivo IEE previsto. Posto isto, repete-se o processo para as condições de referência determinando-se o IEE de referência. Finalmente, com recurso à equação 5 procede-se efetivamente à determinação da classe energética:

$$R_{IEE} = \frac{IEE_{ef,S} - IEE_{ren}}{IEE_{ref,S}} \quad [5]$$

O rácio de eficiência energética, R_{IEE} determina a classificação energética do edifício. A correspondência entre o valor obtido e a classe energética é apresentada na Figura 5.

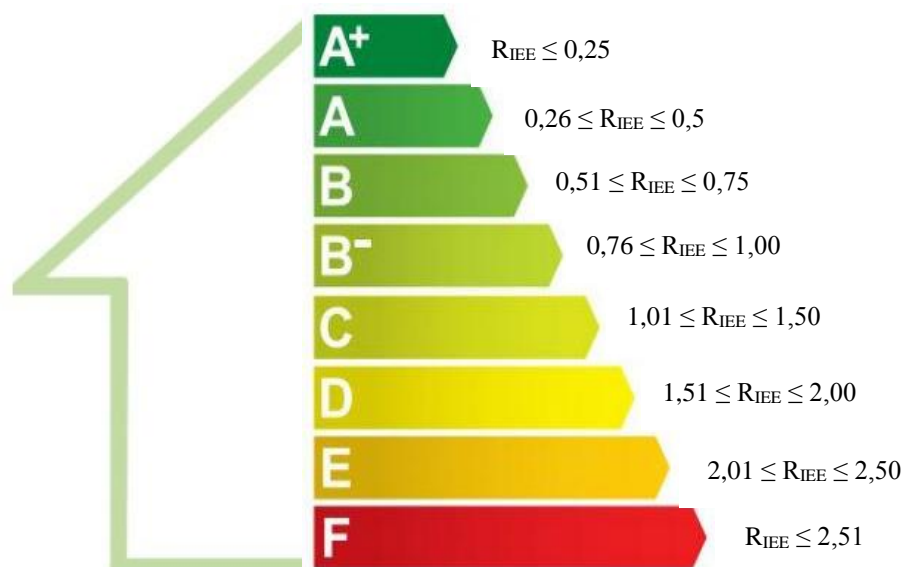


Figura 5 -Correspondência entre o valor de R_{IEE} e a respectiva classe energética, em edifícios de comércio e serviços

4. Simulação computacional

4.1. Simulação dinâmica computacional

Segundo o Decreto-Lei nº118/2013 de 20 de Agosto, entende-se por simulação dinâmica, “a previsão de consumos de energia correspondentes ao funcionamento de um edifício e respetivos sistemas energéticos que tome em conta a evolução de todos os parâmetros relevantes com a precisão adequada, numa base de tempo pelo menos horária, para diferentes zonas térmicas e condições climáticas de um ano de referência”. A simulação dinâmica é pois o método de análise computacional dos consumos energéticos do edifício.

Para que se possa concretizar, com base neste método, uma análise energética com a respetiva determinação do IEE, a simulação dinâmica multizona deve ser realizada por um programa certificado pela norma ASHRAE 140 de acordo com a Portaria nº 349-D/2013 de 2 de Dezembro. Após a avaliação de diferentes programas, a ASHRAE acreditou, entre outros, o programa *EnergyPlus*, *software* escolhido para a elaboração de todas as simulações dinâmicas pertencentes à componente prática desta dissertação.

Para além da necessidade de acreditação pela norma ASHRAE 140, segundo a legislação nacional o programa deve ter a capacidade de modelar:

- Mais do que uma zona térmica;
- Com um incremento de tempo horário e por um período de um ano civil, contabilizado em 8670 horas;
- A variação horária das cargas internas, diferenciadas em ocupação, iluminação e equipamentos;
- Os pontos de ajuste dos termostatos das zonas térmicas e a operação dos sistemas de climatização, permitindo a respetiva parametrização, de forma independente, para dias da semana e fins-de-semana;
- A recuperação de calor do ar de rejeição;
- O efeito de massa térmica do edifício.

Tendo em conta o estado atual da utilização de energia é importante a utilização de uma ferramenta que permita fazer uma verificação regulamentar, bem como prever o impacto das várias estratégias energéticas possíveis, não só na fase de projeto dos edifícios bem como na avaliação dos resultados de uma possível reabilitação de edifícios existentes.

Para fazer a capitalização de todo o potencial energético inerente à poupança energética que pode ser feita no sector dos edifícios, é necessária a utilização de ferramentas de análise energética avançada como é o caso da simulação, que permitem encontrar falhas existentes bem como avaliar o período de retorno de possíveis investimentos, otimizando o edifício.

4.2. EnergyPlus

Tal como referido na secção anterior, foi utilizado o programa *EnergyPlus 8.2.0* como ferramenta computacional de simulação dinâmica de edifícios. Este programa combina as melhores funcionalidades dos seus antecessores *BLAST* e *DOE-2* e a data do seu lançamento remete a Abril de 2001. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos E.U.A. (DEO), este novo programa apresenta novas funcionalidades em relação aos programas de origem, e um código organizado em módulos que permitem uma fácil incorporação de novas funcionalidades por parte dos utilizadores e programadores (Sailor 2008). O *EnergyPlus* está em constante atualização, procurando aperfeiçoar-se e adequar-se às exigências do presente e de projetos futuros.

Para uma correta utilização deste *software* existem etapas que devem ser preferencialmente respeitadas. Numa primeira fase constrói-se o modelo geométrico do edifício com as respetivas zonas, e definem-se os materiais que o constituem bem como os padrões que o definem no interior (perfis de ocupação e utilização, iluminação, equipamentos, temperaturas de conforto, infiltração, etc.) e no exterior (localização, orientações, ficheiro climático etc.). Seguidamente, dá-se a transferência de dados da descrição para dois módulos: módulo de simulação do balanço térmico e o módulo de sistemas. A simulação inicia-se com a atualização das condições relativas à descrição do modelo por parte do módulo de simulação de balanço térmico. Os resultados obtidos funcionam posteriormente como *input* para o módulo de sistemas onde são determinadas as cargas de aquecimento e arrefecimento para o *timestep* definido. Esta informação é reencaminhada para o módulo de simulação do balanço térmico que irá atualizar as condições referentes a cada zona no *timestep* seguinte, e assim sucessivamente.

A Equação 6 explicita o método usado pelo *EnergyPlus* para calcular o balanço térmico correspondente a cada *timestep*:

$$C_z \frac{dT_s}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad [6]$$

Onde:

$C_z \frac{dT_s}{dt}$ – Energia armazenada no ar [W];

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – Somatório de ganhos internos convectivos [W];

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – Transferência de calor convectivo pelas superfícies da zona [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ – Transferência de calor devido a misturas de ar entre zonas [W];

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_s)$ – Transferência de calor devido a infiltração de ar exterior [W];

$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z)$ – Carga térmica do sistema AVAC da zona [W].

A modelação só é possível com uma correta definição de todos os parâmetros de que o programa necessita, preenchidos em formato IDF (*Input Data File*). O preenchimento desses parâmetros é efetuado através do *IDF-Editor*, ao qual é possível ter acesso através do *EP-Launch*, que foi criado para apoiar os utilizadores uma vez que apresenta um especto mais prático quando comparado com a possibilidade de realizar a simulação apenas com recurso à linha de comandos DOS.

Uma das limitações do programa é a inexistência de uma interface gráfica para a construção do modelo geométrico dos edifícios. De forma a ultrapassar esta dificuldade foi utilizado o programa *Sketchup*. O *Sketchup* é um programa de desenho assistido por computador (DAC) que permite o desenho da geometria em três dimensões. Através do *Plug-in – OpenStudio* foi possível associar este programa ao *EnergyPlus* que preenche de forma automática os campos de entrada referentes à geometria em cada modelo, visto que proporciona a gravação em formato IDF.

5. Integração de sistemas de redução de consumos e produção de energia em edifícios

Várias tecnologias energeticamente eficientes e sustentáveis têm sido propostas e implementadas em projetos de construção de baixo consumo (La Roche & Berardi 2014). Estas tecnologias podem passar por sistemas energeticamente eficientes e pela implementação de sistemas de produção de energia renovável. São precisamente duas dessas tecnologias, que irão ser discutidas nas subsecções seguintes.

5.1. Coberturas verdes

As coberturas verdes são sistemas que permitem a integração e o desenvolvimento de um ambiente natural na construção. Existem várias terminologias para este tipo de coberturas: coberturas verdes, telhados verdes, coberturas vivas ou ajardinadas. Na língua inglesa são chamadas *eco roofs* (cobertura ecológica), *green roof* (cobertura verde), *living roof* (coberturas vivas), ou *vegetated roof* (coberturas com vegetação). Na Figura 6 são apresentados alguns exemplos deste tipo de coberturas.



Figura 6 – Exemplo coberturas ajardinadas: Edifício da Escola de artes Design e Media da NanYoung Technological University em Singapura (à esquerda); Habitações em Norðragøta, Faroe Islands (à direita) (Neoturf 2015)

Estas coberturas caracterizam-se pela existência de vegetação na sua última camada e são geralmente construídas com o objetivo de reduzir o consumo de energia, no entanto, apresentam muitas outras vantagens. Este tipo de coberturas permite a transformação de espaços muitas vezes inutilizados em espaços verdes mais sustentáveis, sem comprometer o desenvolvimento urbano (Stater 2011). São passíveis de ser implementadas tanto em edifícios ainda em fase de projeto, como em edifícios existentes.

5.1.1. Sistema Construtivo

Contrariamente ao que se poderia pensar, o sistema de coberturas verdes não interfere ou danifica o sistema construtivo existente sobre ele, podendo pelo contrário, contribuir para o aumento do tempo de vida deste. É evidente que este tipo de coberturas carece de manutenção acrescida comparativamente com uma cobertura convencional, uma vez que apresenta organismos vivos na sua constituição.

A Figura 7 representa esquematicamente as várias camadas que, de forma geral, compõem um sistema de coberturas verdes. É importante referir que a distribuição das camadas, bem como dos

elementos que as compõem não é linear, podendo-se adotar diferentes configurações consoante as necessidades e características do local a implementar.

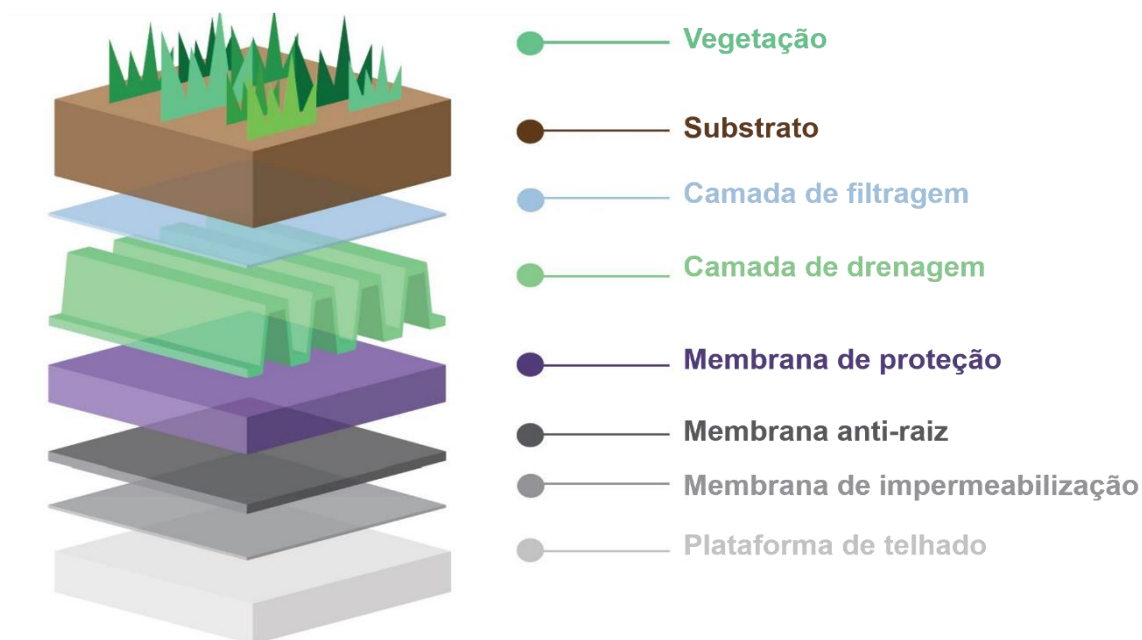


Figura 7 – Esquema ilustrativo das várias camadas que compõem uma cobertura verde. Adaptado de (Growing Green Guide s.d.)

Cada uma das camadas tem uma determinada constituição e função associada. Nos pontos seguintes será feita uma explicação referente ao propósito da existência de cada camada, partindo da camada mais exterior para a mais interior:

- **Vegetação:** pode variar muito, apresentando espécies e tamanhos muito variados. A escolha da vegetação a usar é feita consoante o objetivo da cobertura;
- **Substrato:** constituído por uma variada mistura de materiais orgânicos agregados, apresenta espessuras muito variadas dependendo do tipo de cobertura e da vegetação pretendida;
- **Camada de filtrante:** separa as camadas de vegetação e substrato da camada de drenagem. A “folha” de filtro impede que pequenas partículas e materiais orgânicos passem para a camada de drenagem, prevenindo o seu entupimento nas saídas de água. Estas camadas são preferencialmente feitas de geotêxteis como a lã (IGRA 2015).
- **Camada de drenagem:** tem a função de permitir o escoamento da água em excesso para drenos ou dispositivos de evacuação, retendo a quantidade de água necessária ao crescimento da vegetação. Dependendo do projeto e dos materiais pode ainda ter funções adicionais como o alargamento e arejamento da zona da raiz. Devido às restrições de peso no telhado normalmente esta camada é feita de materiais leves como plásticos e borracha, outras camadas são feitas de cascalho, argila expandida ou telhas de barro (IGRA 2015);
- **Membrana de proteção e membrana anti raízes:** têm como função proteger da vegetação as camadas mais interiores. É concebida para que seja resistente à perfuração;
- **Membrana de impermeabilização:** uma vez que existem seres vivos no sistema, e portanto necessidade de água, esta camada é de extrema importância uma vez que impermeabiliza o sistema, impedindo a passagem de água para os elementos construtivos existentes;
- **Plataforma de telhado:** que pode apresentar diferentes tipos de construção, mas que de forma geral é onde se localiza o isolamento térmico, a camada de forma e o suporte construtivo. Estes elementos têm como função diminuir a transmissão de calor, nivelar a cobertura e estruturar a construção.

É importante voltar a referir que a solução construtiva descrita anteriormente é muito geral. Por exemplo, existe uma solução denominada cobertura invertida em que o isolamento se encontra na camada anterior à camada de impermeabilização. Existem ainda certas coberturas que não possuem algumas das camadas descritas, o que pode dever-se ao facto de se tratarem de construções antigas ou de não existir em Portugal legislação a cumprir nesta área.

O processo construtivo deste tipo de coberturas deve ser bastante rigoroso, nomeadamente no que diz respeito a aspetos estruturais (devido ao peso elevado do substrato e vegetação), térmicos, acústicos e de drenagem de água. Como tal, todo este processo deve ser realizado por especialistas da área. Para obter uma informação mais detalhada, grande parte das entidades envolvidas nestes processos usam o regulamento alemão FLL-Guidelines -(Cristina et al. 2014).

5.1.2. Tipologias de coberturas verdes

De acordo com a IGRA (*International Green Roof Association*) as coberturas verdes podem ser de três tipos:

- Cobertura extensiva
- Cobertura semi-intensiva
- Cobertura intensiva

É importante referir que o sistema construtivo apresentado acima é aplicável a qualquer um dos três tipos de cobertura verde, sendo que a complexidade e funcionalidade difere de tipo para tipo. A Tabela 2 apresenta uma breve caracterização de cada um deles, e ao longo das secções seguintes será efetuada uma explicação mais detalhada.

Tabela 2 - Comparação entre as três principais tipologias de coberturas verdes. Adaptado de (IGRA 2015)

	Tipologia		
	Extensiva	Semi-Intensiva	Intensiva
Manutenção	Inexistente / Baixa	Periodicamente	Alta
Irrigação	Inexistente / baixa	Periodicamente	Regularmente
Tipo de Vegetação	Musgos, Sedum, Herbáceas e relvas	Arbustos e Herbáceas	Arbustos e Árvores
Peso (kg/m²)	60-150	120-200	180-500
Custo	Baixo	Médio	Alto
Uso	Funções ecológicas	Funções ecológicas e lazer	Jardim e convívio

5.1.2.1. Cobertura extensiva

As coberturas extensivas são as mais vistas em edifícios. Este tipo de cobertura caracteriza-se por ser bastante simples e de manutenção reduzida. Isto acontece uma vez que possuem vegetação simples e resistente com reduzida ou inexistente necessidade de irrigação, e elevado tempo de vida. Na maior parte dos casos, este tipo de coberturas é usado para desempenhar funções ecológicas. Além da vegetação simples, também a camada de substrato é reduzida, o que as torna leves e reduz a carga imposta ao edifício. São indicadas para coberturas inclinadas e podem atingir grandes áreas (Ferreira 2013). São cada vez mais frequentes em projetos de modernização devido ao seu baixo custo de execução (Varela 2011). A Figura 8 apresenta o pormenor construtivo referente a coberturas extensivas.

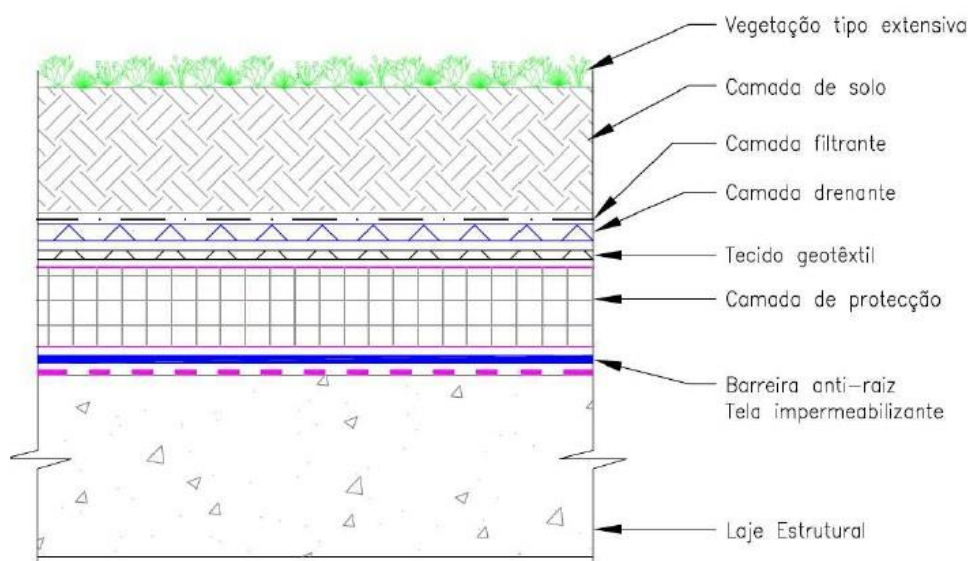


Figura 8 - Pormenor construtivo de uma cobertura jardim extensiva (Ferreira 2013)

5.1.2.2. Cobertura intensiva

As coberturas intensivas caracterizam-se pela implementação de vegetação com elevado porte traduzindo-se assim num sistema mais complexo e com maiores exigências e custos no âmbito de execução e manutenção (Ferreira 2013). São denominadas como jardins de telhado uma vez que permitem uma grande diversidade de vegetação e de habitats, podem ser visitadas e utilizadas como áreas de convívio e lazer. A camada de substrato que sustenta a vegetação é relativamente profunda, o que torna esta cobertura pesada e obriga a que o edifício que a sustenta apresente uma estrutura mais forte. Pelo mesmo motivo a sua capacidade isolante é consideravelmente superior às restantes coberturas (Figura 9).

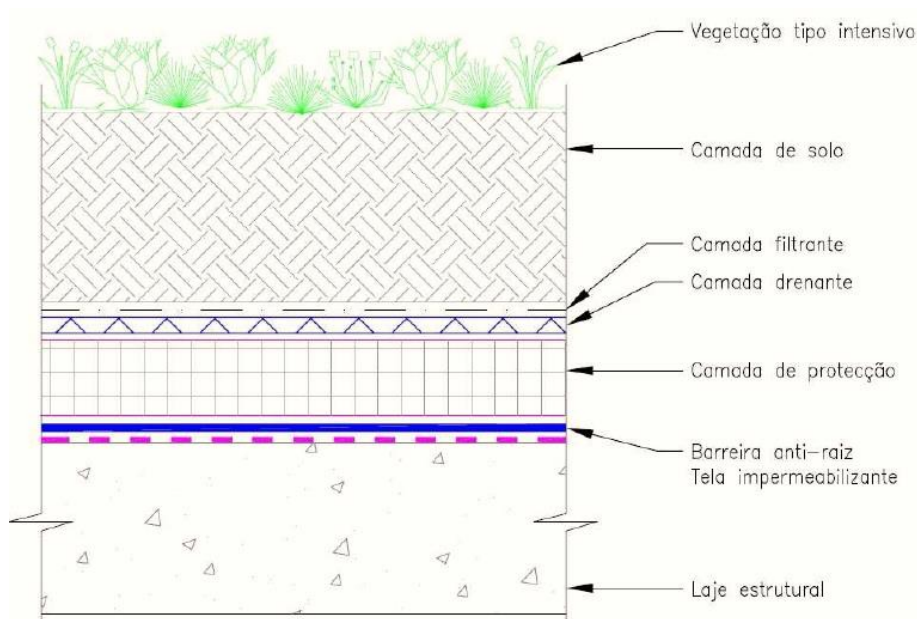


Figura 9 - Pormenor construtivo de coberturas de jardim intensivas (Ferreira 2013)

5.1.2.3. Cobertura semi-intensiva

O terceiro tipo de cobertura é a semi-intensiva. É um conceito recente em relação aos dois anteriores e pode dizer-se que é uma conjugação dos dois tipos anteriormente apresentados, mas com grande semelhança às coberturas extensivas. O objetivo é que se usem substratos mais leves contrariamente às coberturas intensivas mas que seja possível optar entre uma vasta espécie de vegetação. Apesar de ter maiores custos de execução e manutenção, este é compensado com melhores desempenhos térmicos e acústicos (Ferreira 2013). São normalmente áreas visíveis e funcionais.

5.1.3. Vantagens e desvantagens

As coberturas verdes, tal como foi mencionado acima, apresentam-se como uma solução para amenizar os impactos negativos relacionados com os edifícios. Este ponto serve para aprofundar alguns dos seus benefícios ambientais, estéticos e económicos. É importante referir que todos os benefícios e dados apresentados têm por base uma pesquisa bibliográfica que incide em experiências e estudos de investigação, e como tal dependem das características e particularidades de cada caso e local.

5.1.3.1. Vantagens estéticas e de utilização

As vantagens estéticas associadas são facilmente perceptíveis. Bastaria imaginar qual seria o resultado da substituição de todas as coberturas de uma cidade por coberturas verdes, para nos apercebermos da vantagem de poder usufruir de paisagens naturais que transmitem sensações de conforto e relaxamento, diminuindo o stress.

O elevado valor associado aos terrenos no meio urbano é, muitas vezes, um impedimento à criação de novos espaços verdes e como tal, estas coberturas podem ser uma solução para proporcionar espaços de convívio e lazer, para além de valorizarem os próprios edifícios. Embora seja difícil quantificar o valor dessa valorização, foi relatado pela CABA (*Commission for Architecture and the Built Environment*) que o preço associado a edifícios perto ou com vista para espaços verdes, pode ser entre 6 a 8% superior aos restantes (Mahdiyar et al. 2015), evidenciando a importância deste tipo de espaços na vida quotidiana.

Outra vantagem é a possibilidade de produção de alimentos, independentemente do local. Há uma preocupação crescente com a qualidade dos alimentos e a forma como são produzidos. De acordo com um artigo publicado na *Nature Climate Change* (Hertel 2016), o aumento dos níveis de temperatura e dos gases de efeito de estufa poderão reduzir as colheitas agrícolas em 10% até 2050. A utilização destas coberturas promove a redução de consumos ao nível do edifício bem como, de certa forma, contribui para a redução da poluição associada ao transporte de alimentos, sendo uma mais-valia e contribuindo para amenizar esta problemática.

5.1.3.2. Vantagens ambientais

As vantagens ambientais associadas às coberturas verdes são inúmeras. Questões relacionadas com a biodiversidade em meio urbano são sempre bastante discutidas. As coberturas verdes contribuem significativamente para o aumento da biodiversidade, funcionando como uma compensação ecológica. Esta melhoria é visível em todas as aplicações, no entanto, em cidades o seu efeito é mais perceptível uma vez que estas normalmente não reúnem as condições necessárias à vida de certos animais.

Outro dos problemas ambientais que estas coberturas podem minimizar diz respeito à retenção das águas pluviais nas coberturas dos edifícios. Construção é quase sempre sinónimo de área impermeável, o que faz com que as águas ao invés de serem absorvidas escurram superficialmente para os sistemas de drenagem. Em caso de chuvas intensas, esses sistemas atingem o limite causando cheias. Dependendo do tipo de cobertura e da espessura do substrato este sistema pode reter entre 50-90% das águas pluviais, que na maioria retorna ao ambiente através do sistema de evaporação e transpiração da planta (IGRA 2015). Para além de reduzirem o volume de água perdida superficialmente, também melhoram a qualidade da mesma, uma vez que o substrato tem a capacidade de reter parte dos poluentes presentes nas águas.

Também a qualidade do ar experiencia o efeito positivo destes sistemas. A vegetação recebe dióxido de carbono reduzindo-o e produzindo oxigénio. No caso dos metais pesados, existem estudos que demonstram que a camada vegetativa pode reter 95% do cádmio, cobre e chumbo e, 16% de zinco (Neoturf 2015). Uma melhor qualidade do ar tem influência positiva na condição de saúde das populações, uma vez que contribui para a redução de doenças alérgicas e de foro respiratório.

Outro fenómeno cujas consequências poderiam ser amenizadas com recurso a coberturas verdes é o efeito ilha de calor, ou seja, a diferença de temperatura entre o interior de uma cidade e a sua envolvente. Um aumento elevado da emissão de gases com efeito de estufa por parte dos veículos e das indústrias pode induzir a que essa diferença de temperatura atinja cerca de 10°C. Este tipo de coberturas poderia funcionar como um “ar condicionado” natural, absorvendo 80% da energia emitida pelo edifício através da evapotranspiração do conjunto solo-planta e da humedificação ao ar (IGRA 2015).

A Figura 10 demonstra esse efeito, na cidade de Nova York. Foram recolhidas imagens de satélite em infravermelho que evidenciam uma clara tendência a temperaturas mais baixas em locais mais densos em vegetação.

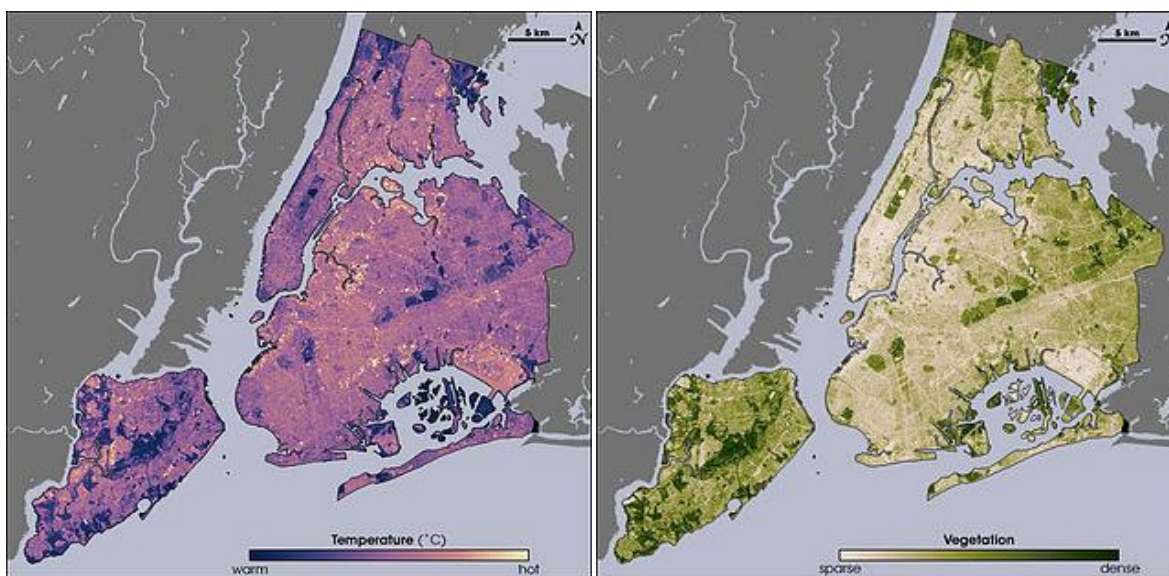


Figura 10 – Relação entre a abundância vegetativa e a temperatura associada a cada local, na cidade de Nova York. Imagens obtidas com recurso a imagens de satélite em infravermelho (Earth Observatory 2006)

O ruído intenso nas cidades é outro problema passível de ser amenizado utilizando coberturas verdes. O isolamento acústico foi uma das principais razões para a instalação de uma cobertura verde no edifício da Gap’s 901 Cherry Hill na Califórnia, visto que este se situa perto de uma via rápida muito ruidosa e na rota do aeroporto internacional de São Francisco. A cobertura reduziu a transmissão de ruídos em cerca de 50 decibéis (Neoturf 2015). Isto acontece devido à combinação solo-substrato, em que o substrato bloqueia parte das frequências mais baixas, e a vegetação as frequências mais

altas apresentando-se como uma ótima solução para construções próximas de locais com tráfego elevado (Cristina et al. 2014).

5.1.3.3. Vantagens económicas

A primeira impressão quando se pensa na implementação de coberturas verdes é certamente de que irão danificar as telas e isolantes da cobertura existente provocando grandes despesas a longo prazo. O que acontece na realidade é que quando instalada por profissionais, seguindo os métodos corretos, este tipo de cobertura prolongará o tempo de vida dos materiais da cobertura (protege dos raios solares, diminui a temperatura, reduz a amplitude térmica, etc.), resultando em benefícios económicos para o utilizador. A amplitude térmica associada a uma cobertura normal é de aproximadamente 100°C, decrescendo para 35°C quando se trata de uma cobertura verde. A esperança média de vida para telhados comuns é de 15 a 25 anos, este tipo de cobertura pode duplicar esse valor segundo pesquisas efetuadas na Europa (IGRA 2015).

Uma das vantagens mais conhecidas é a poupança energética associada a este tipo de coberturas quer no aquecimento quer no arrefecimento, consequência da melhoria da eficiência energética devido ao desempenho térmico destas coberturas. A combinação solo-planta além de aumentar o isolamento térmico (diminuindo os ganhos no verão e as perdas no inverno) reduz também a absorção de calor pela cobertura, que resultam em poupanças energéticas na ordem dos 3 - 10% (Greater London Authority 2008). Climas onde o ar condicionado é essencial para a manutenção das condições conforto são os mais favoráveis à adoção de coberturas verdes: cada redução de 0,5° C na temperatura interior do edifício reduzirá o consumo de energia (destinada a aparelhos de ar condicionado) em mais de 8%. Em Toronto, após a instalação de uma cobertura verde com 10 cm de espessura de substrato, as necessidades de uso de ar condicionado durante o período quente reduziram-se em 25% (Neoturf 2015). Essa poupança também se verifica na estação de aquecimento (dependendo da espessura do substrato) devido a característica isolante desta cobertura. Para além da profundidade do substrato e da altura da vegetação, existem outros fatores não mencionados neste texto que condicionam o valor associado à poupança energética, como a dimensão índice da vegetação e o nível de irrigação do local (Silva et al. 2016). A questão da poupança energética irá ser discutida com mais detalhe nos capítulos seguintes. É fundamental sublinhar o facto que os dados mencionados constituem sempre estimativas, e por isso, variam com as condições meteorológicas do local e com as características da cobertura e do edifício.

Existem porém alguns aspetos menos positivos na aplicação destes sistemas. Há uma carga associada a este tipo de construção, que mediante o tipo de cobertura verde (extensiva ou intensiva) pode não ser suportável pela estrutura do edifício. As coberturas intensivas têm mais peso associado, enquanto as extensivas são as melhores soluções para edifícios com menor capacidade estrutural. Na contabilização das cargas exercidas no edifício, há que ter em conta não só o peso dos seus constituintes, mas também o peso associado às águas pluviais que ficam retidas na cobertura.

Outro problema é a manutenção, que também é dependente do tipo de cobertura. Esta pode ser praticamente inexistente no caso das coberturas extensivas, que necessitam de pouca rega e fertilização (necessitando apenas de visitas periódicas) e portanto com poucos custos associados, ou regular e dispendiosa no caso de coberturas mais complexas e que exigem maiores cuidados. Uma pequena análise económica será feita nos capítulos seguintes.

5.1.4. Dimensionamento de um sistema de coberturas verdes

Devido aos aspetos positivos das coberturas verdes pode verificar-se um crescimento generalizado no reconhecimento de que estas coberturas podem reduzir os consumos de energia nos edifícios. O maior problema encontrado está no número reduzido de ferramentas existentes que possibilitem aos investigadores um estudo mais detalhado para a quantificação dessas poupanças tendo em conta as várias opções disponíveis como tipo e profundidade do solo, vegetação, irrigação, entre outras (DOE 2013).

Atualmente existem vários programas capacitados para simular térmica e energeticamente um edifício como é o caso do eQuest, DOE-2, TRNSYS e do EnergyPlus. Relativamente ao último, a sua descrição foi já feita na Secção 4.2, onde se destacou o apoio e incentivo por parte do DEO para o seu desenvolvimento, bem como a sua capacidade de incorporação de novas funcionalidades. Devido a estes e outros motivos, o EnergyPlus foi o *software* escolhido para a implementação de um modelo de simulação de coberturas verdes.

David J. Sailor do Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais da Universidade de Portland, desenvolveu um modelo computacional que através dos processos de transferência de calor que descrevem as coberturas verdes, simula os seus efeitos na envolvente de um edifício. É este o modelo implementado no EnergyPlus, em que o modelo opera como uma camada exterior da cobertura do edifício.

5.1.4.1. O modelo de Sailor

A conceção deste modelo foi baseada no modelo FASST (Fast All Season Soil Strength) desenvolvido por Frankenstein e Koenig, que por sua vez foi baseado em BATS (Biosphere Atmosphere Transfer Scheme) e SIB (Simple Biosphere Model). FASST foi inicialmente criado para determinar a capacidade dos terrenos para suportar o movimento de veículos e pessoas. Para se adequar ao modelo de Sailor (2008), este sofreu ligeiras modificações de modo a que fosse aplicável em solos com espessuras inferiores (Sailor 2008).

Tal como acontece com uma cobertura tradicional, o balanço de energia de uma cobertura verde é dominado pela força radiativa proveniente do sol e pelos fluxos de calor sensível (convecção) e latente (evaporação) do solo e das superfícies das plantas, combinados com a condução de calor para o interior do solo e pela radiação do, e para o solo e superfície das folhas (Sailor 2008). Designa-se por calor sensível uma troca de calor em que existe variação de temperatura em um determinado corpo, e por calor latente uma troca de calor em que exista mudança de estado físico de uma determinada substância ou corpo. A Figura 11 representa o balanço referido.

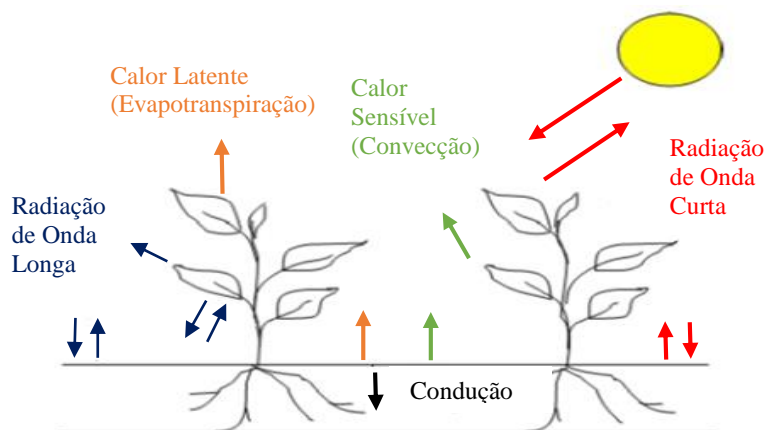


Figura 11 – Fluxos de energia de uma cobertura ajardinada, adaptado de (Sailor 2008)

Resumidamente, o modelo tem em conta os seguintes pontos (Cristina et al. 2014):

- Trocas radiativas de onda curta e longa dentro da copa da planta;
- Efeitos da convecção de calor na copa da planta;
- Evaporação do solo e das plantas;
- Condução de calor (e armazenamento) na camada de solo;
- Variação das propriedades térmicas do solo com a humidade.

A base de funcionamento deste modelo baseia-se no balanço de energia de duas camadas que se complementam: a camada da vegetação e o solo. Definem-se, para cada uma delas, equações que definem os fluxos de calor sensível e de calor latente e que se encontram explicitadas no Anexo A.

Sailor (2008) enumerou no seu modelo, algumas características pertencentes a cada uma das camadas como sendo as mais relevantes nas trocas de calor existentes entre elas. Relativamente ao solo enumerou a condutividade térmica, o calor específico e a densidade. No entanto, refere que a camada mais importante e com maior influência nos impactos das trocas de calor é sem dúvida a camada de vegetação considerando, a altura, LAI (*Leaf Area Index*), a fração coberta, o albedo e a resistência estomática. LAI define-se como a projeção da área de folhas por unidade de solo. Se a parcela média de cobertura é menor que 2, então LAI toma o valor 2. A fração coberta de vegetação estando relacionada, é muito distinta da definição de LAI. Especificamente, esta representa a fração da cobertura que é diretamente coberta por uma ou mais folhas, o que torna esta característica importante uma vez que dita o papel das características do solo no balanço total de energia. O albedo representa a refletividade da superfície à energia solar incidente. Finalmente, a resistência estomática é um parâmetro biofísico que regula a taxa com que a planta transpira humidade através da folha para uma dada condição de clima (Sailor 2008).

5.1.4.2. Aplicabilidade do modelo em EnergyPlus

Esta secção tem como objetivo permitir uma melhor compreensão da implementação do modelo anteriormente apresentado no programa *EnergyPlus*, abordando por um lado as limitações dessa interação e, por outro os parâmetros exigidos para uma correta simulação.

Começando pelas limitações, é importante referir que o ponto “Variação das propriedades térmicas do solo com a humidade” referente ao modelo de Sailor (apresentado no subcapítulo anterior) não se encontra funcional no *EnergyPlus*. Isto acontece devido à utilização do algoritmo CFT (*Conduction Transfer Function*), usado por Sailor (2008) e até ao momento o único que suporta o modelo das coberturas verdes, mas que não suporta a variação dessas propriedades. Futuras melhorias no modelo de Sailor irão passar certamente pela possibilidade de utilização de um algoritmo mais abrangente.

Outro aspeto a referir é de que o modelo não tem em conta os efeitos de todas as camadas que compõem um sistema de coberturas verdes, identificadas e representadas no ponto 5.1.1, como as camadas de drenagem e as membranas de impermeabilização e proteção. Uma outra limitação relativa à interação deste modelo com o *EnergyPlus*, consiste no facto de que apesar de se poder estender a cobertura verde a um número elevado de zonas, apenas é possível definir um tipo de cobertura verde por simulação.

A interface que traduz a aplicabilidade do modelo de Sailor em *EnergyPlus* encontra-se ilustrada na Figura 12. Para proceder à introdução dos dados necessários e consequente simulação, o utilizador tem que aceder ao IDF Editor e no grupo *Surface Construction Elements* selecionar o campo *Material:RoofVegetation*. Todos os parâmetros necessários aos cálculos referentes às coberturas verdes são limitados por um intervalo de valores definido pelo *EnergyPlus*, e apenas alguns são de preenchimento obrigatório (a azul na Figura 12).

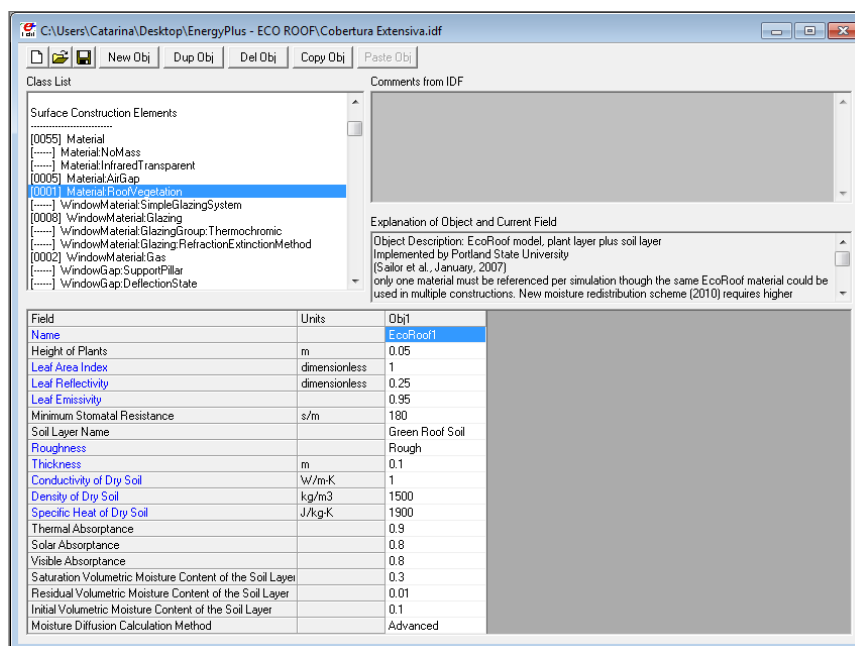


Figura 12 – Interface EnergyPlus, representação do menu e respectivos campos referentes às coberturas verdes

Para os restantes, o programa adota valores de referência. Na Tabela 3 é apresentada a descrição de cada um dos parâmetros a ter em conta, bem como os valores de referência do EnergyPlus ou da gama de valores que é possível adotar com recurso a referências bibliográficas.

Tabela 3 – Descrição e gama valores utilizáveis para cada um dos parâmetros de cálculo de coberturas verdes

Propriedades	Descrição	Gama de valores	Referência
Altura das plantas [m]	Altura da vegetação adotada.	[0.01, 1.0]	Sailor 2008
Índice de área foliar [-]	Área projetada da folha por unidade de área da superfície do solo.	[0.001,5]	Sailor 2008
Refletividade da folha [-]	Fração de radiação solar incidente refletiva pela superfície de folha individual. Radiação do espectro visível, infravermelhos e ultravioleta.	2.5	Ouldbou-khitine, Belarbi e Sailor (2014)
Emissividade da folha [-]	Razão entre a radiação térmica emitida pela superfície da folha e a que é emitida por um corpo negro ideal à mesma temperatura. Utilizado nas trocas radiativas de onda longa na superfície da folha.	0.95	Valor de referência EnergyPlus
Resistência estomática mínima [s/m]	Resistência das plantas ao transporte de humidade. Valores mais baixos indicam maiores taxas de evapotranspiração.	180	Valor de referência EnergyPlus
Rugosidade [-]	Determinado com recurso a uma lista de opções dada pelo programa. Define a rugosidade relativa de uma camada de material específico. Parâmetro que influencia apenas o coeficiente de convecção exterior.	[Muito rugosa; muito lisa]	Definido pelo utilizador segundo as opções do EnergyPlus
Espessura [m]	Profundidade da camada de substrato	[0.1,0.35]	Cristina M. Silva; M. Glória Gomes; Marcelo Silva. (2016)
Condutibilidade do solo seco [W/mK]	Condutibilidade térmica do substrato seco.	1	Propriedade de Materiais (2014)
Massa volúmica do solo seco [kg/m³]	Massa volúmica do substrato seco	1500	Propriedade de Materiais (2014)
Calor específico do solo seco [J/kgK]	Calor específico do substrato seco	1900	Propriedade de Materiais (2014)
Absortância térmica [-]	Fração do comprimento de onda longo da radiação incidente que é absorvida pelo substrato.	0.9	Valor de referência EnergyPlus
Absortância solar [-]	Fração da radiação solar incidente que é absorvida pelo substrato.	0.8	RECS (2013)
Absortância visível [-]	Fração do comprimento de onda visível da radiação da radiação incidente que é absorvida pelo substrato.	0.8	RECS (2013)

É ainda possível definir e utilizar, caso exista, o sistema de irrigação que serve este tipo de cobertura no campo *Site:Precipitation* (DOE 2013).

Depois de definidos os parâmetros que constituem o material destas coberturas, o passo seguinte passa por indicar que esta será a camada mais exterior da construção referente à cobertura, em cada uma das zonas desejadas.

Como o modelo de Sailor assenta num conjunto de equações (Anexo A), quando, na sua análise, o programa encontra uma camada de construção exterior do tipo cobertura verde, automaticamente se iniciam os processos de cálculo necessários que recorrem a essas equações e aos parâmetros anteriormente estabelecidos para o efeito, determinando o seu comportamento térmico.

5.2. Energia Solar Fotovoltaica

No ano de 2002, a potência mundial instalada de energia solar fotovoltaica ultrapassou os 2 GW e 10 anos depois esse valor era já de cerca de 100 GW. Em 2013 foram somados 39 GW a esta equação e durante um determinado período, a potência instalada anualmente era já superior à de energia eólica (Renewable & Agency 2015). Em Portugal, de 2005 a 2014 foi também a energia eólica a líder de crescimento em potência instalada. No entanto, em termos relativos, a tecnologia que mais cresceu foi efetivamente a solar fotovoltaica, tendo evoluído de uma potência instalada residual, para 321 MW registados em Maio de 2014 (Figura 13) e uma produção de 518 GWh para a mesma data (Geologia 2014).

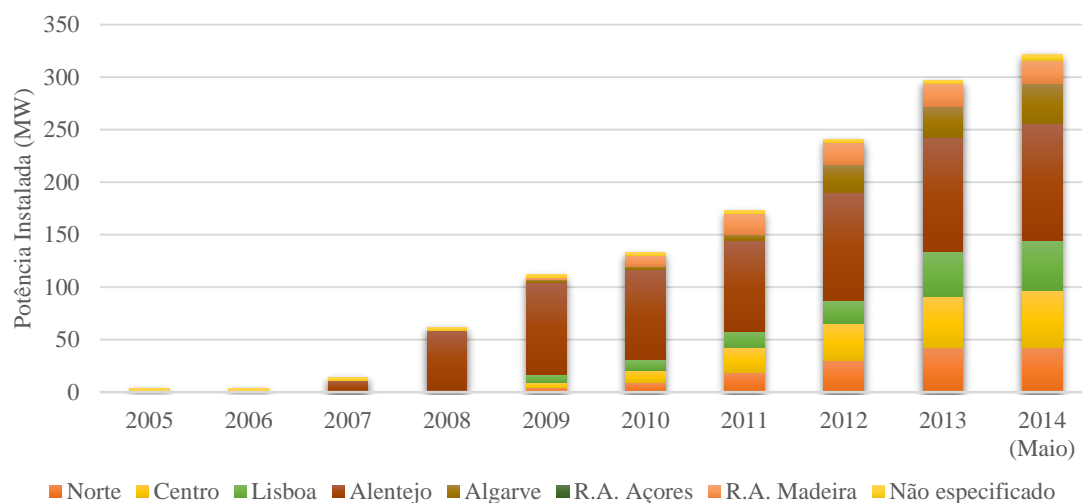


Figura 13 – Evolução e segmentação da potência fotovoltaica instalada Portugal (Geologia 2014)

Este aumento na potência instalada poderá estar intimamente interligado com a subida significativa da curva de aprendizagem para a energia solar fotovoltaica, que combinada com a elevada capacidade de fabricação por parte das indústrias, resultou em quedas significativas de preços nos últimos anos. A Figura 14 apresenta a evolução média de preços dos módulos fotovoltaicos para diferentes tipos de tecnologias (e local de produção das mesmas) entre de 2009 e 2012 em USD/W (Renewable & Agency 2015).

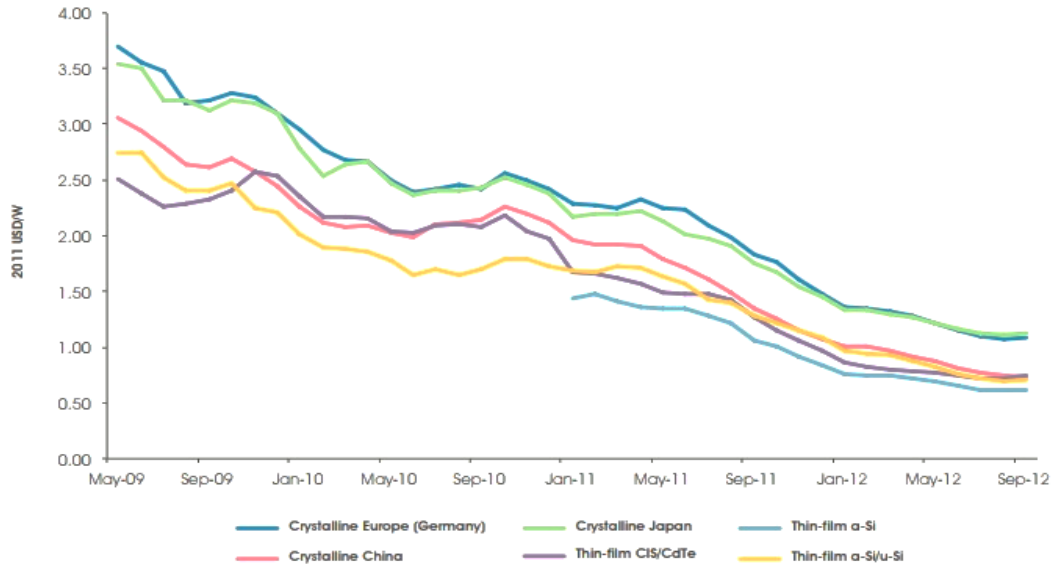


Figura 14-Variação do preço médio mensal de módulos fotovoltaicos para diferentes tipos de tecnologia (Renewable & Agency 2015)

Existe uma ampla gama de preços no mercado associada aos componentes que compõem este tipo de tecnologia, variando consoante o fabricante, tipo de estrutura, características de mercado e eficiência do módulo. Existem diferentes vertentes para a aplicação deste tipo de tecnologia, como a produção de energia em grande escala ou a aplicação no sector residencial. Em qualquer dos casos este tipo de sistema apresenta tanto vantagens ambientais como vantagens para o próprio consumidor através da venda de energia ou da redução da fatura energética.

5.2.1. Sistema solar fotovoltaico

Sistemas de energia solar fotovoltaica convertem a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica, por consequência do chamado efeito fotovoltaico. A energia elétrica gerada nessa conversão pode ser entregue à rede - sistemas ligados à rede - ou utilizada para alimentar as necessidades energéticas de uma rede isolada - sistemas autónomos -, que diferem entre si no que toca às necessidades a satisfazer bem como aos componentes que os constituem.

A célula fotovoltaica é o elemento base de um módulo fotovoltaico e quando isolada produz uma quantidade reduzida de energia. Para atingir potências mais elevadas estas unidades são integradas e ligadas em série e em paralelo, e em conjunto com outros elementos formam o módulo fotovoltaico.

A eficiência de um módulo fotovoltaico é o parâmetro mais usado para comparar o desempenho entre diferentes células solares e é definido como a razão entre a potência da célula e a quantidade de energia solar recebida (PVEducation 2014) como mostra a Equação 7.

$$\eta = \frac{P}{I \times A_c} \quad (7)$$

onde P representa a potência do módulo (Wp), I a irradiância solar (W/m²) e A_c a área de superfície do elemento (m²). Estes valores são calculados pelos fabricantes e medidos sobre condições teste pré-estabelecidas ou STC (*Standard Test Conditions*): irradiância 1000 W/m², espectro de massa AM 1.5, e 25°C de temperatura. Existem outros fatores que são importantes na escolha do tipo de

tecnologia indicado para cada situação como a orientação do próprio sistema, espaço disponível para a sua implementação e custos associados.

Tipicamente, as células solares podem ser organizadas em dois tipos principais de tecnologias (Cerón et al. 2013):

- Silício Cristalino (c-Si), cujo módulo é produzido através da interligação de várias células Si convencionais. As suas principais vantagens são a alta fiabilidade demonstrada no seu uso ao longo de décadas, e a alta eficiência de conversão. Estes aspetos conferem-lhe a maior potência instalada por unidade de área comparativamente a outras tecnologias. Existem células de silício monocristalino, multicristalino.
- Filmes Finos (TFSC), que são produzidos através da deposição de finas camadas de material semiconductor, de modo a obter um elemento fino, plano, rígido e flexível. Tem como principais vantagens a sua espessura reduzida, ampla gama de possibilidades de integração devido a sua flexibilidade dimensional e geométrica e ao facto de poder ser colocado sobre outros materiais (vidros metais e polímeros flexíveis).

A Tabela 4 apresenta o valor de eficiência associado a cada tipo de tecnologia.

Tabela 4- Eficiências dos módulos solares associadas a cada tipo de tecnologia (Cerón et al. 2013)

Tecnologia		Eficiência
Silício Cristalino (c-Si)	Si-mono	14%-16%
	Si-multi	12%-15%
Filmes Finos (Thin film solar cells 'TFSC')	a-Si	5%-7%
	CIS	10%-13%
	CIGS	11%-13%
	CdTe	10%-12%

Para além dos módulos fotovoltaicos são necessários outros componentes para o correto funcionamento do sistema como o inversor de corrente, cabos de ligação, suportes e baterias. O inversor é um dos componentes mais importantes. Este estabelece a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede/carga. A sua principal tarefa consiste na conversão do sinal elétrico CC (corrente contínua) produzido pelo gerador fotovoltaico em sinal elétrico AC (corrente alternada), e no seu ajuste para a frequência e nível de tensão da rede a que está ligado. Com o objetivo de fornecer à rede elétrica a maior potência possível, o inversor deve funcionar no ponto MPP (*Maximum Power Point*) do gerador fotovoltaico, que pode altera-se de acordo com as condições meteorológicas. O sistema de rastreio MPP garante que o inversor seja constantemente ajustado ao ponto MPP do gerador (Energia 2004).

5.2.2. Considerações para a instalação

Todo o processo de dimensionamento de uma instalação fotovoltaica deve ser feito de forma ponderada. Existem alguns critérios que devem ser tidos em conta nomeadamente:

1. Avaliação da viabilidade do projeto
2. Avaliação criteriosa da radiação solar disponível e do clima do local;
3. Verificação do sombreamento sobre os painéis;
4. Identificação da área de implementação disponível;
5. Determinação da inclinação e azimutes ótimos;
6. Avaliação criteriosa das necessidades energéticas;

7. Dimensionamento e seleção dos principais componentes do sistema;
8. Revisão do projeto.

O primeiro passo consiste na verificação da viabilidade do projeto, ou seja, a determinação de garantias de que o projeto irá ser uma mais-valia para o edifício comparativamente com outras opções. Para que isto aconteça é necessário conhecer qual a potencialidade física e geográfica do local. Seguidamente deve ser avaliada a carga energética através de uma análise relativamente à utilidade que se vai dar à instalação. Finalmente são escolhidos todos os componentes do sistema que no caso de sistemas isolados são painéis fotovoltaicos, inversores, baterias, controladores de carga e cabos.

5.2.3. Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico

Tal como foi referido anteriormente, o processo de dimensionamento deve ser cuidado em todas as suas etapas e existem várias opções para o fazer. Pode recorrer-se a estatísticas existentes ou a métodos de *design* e estudo computacional. Nos últimos anos, assistimos a uma notável evolução por parte da indústria das tecnologias de trabalho computacionais. Se essa evolução for aliada à preocupação com a diminuição de consumos e incentivo à produção renovável, surgirão ferramentas de trabalho que dão um novo estímulo ao aproveitamento de energia.

Atualmente existem, ferramentas que nos permitem adquirir dados reais em curto espaço de tempo e para um grande número de localizações. O PVGIS (*Photovoltaic Geographic Information System*) é uma dessas ferramentas disponibilizada pela Comissão Europeia. Esta aplicação permite a obtenção dos valores de radiação solar diária para qualquer ponto da Europa (e não só) e a sua interface é a apresentada na Figura 15. Existem outras bases, com diferentes períodos de observação e tratamento de dados, no entanto, PVGIS é a aplicação mais usual por ser bastante intuitiva.

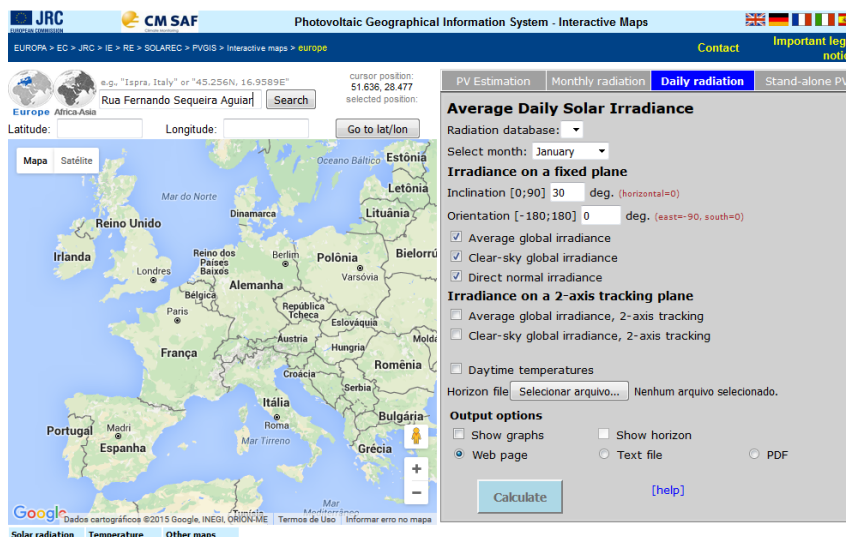


Figura 15 - Interface PVGIS

Depois de obtidos os valores da capacidade radiativa associada ao local, é efetuado o tratamento de dados tendo em conta as características físicas e geográficas do local. O passo seguinte passa pela escolha e dimensionamento dos componentes mais indicados para a situação. Essa seleção pode ser feita, por exemplo, com recurso ao SMA - Sunny Design Web, composto por uma extensa base de dados para todos os componentes que compõem estes sistemas, e cuja escolha pode ser feita em modo manual (escolha feita pelo utilizador,) ou em modo de dimensionamento automático onde a própria interface sugere o melhor conjunto de componentes para o projeto em questão. Outras aplicações que permitem o dimensionamento destes sistemas são, por exemplo, o Skelion, PVsyst, SolTerm entre outras, que provam da evolução tecnológica recente neste sector.

6. Caso de Estudo

6.1. Recolha de informação

A primeira etapa do trabalho consistiu na recolha de informação, tão detalhada quanto possível, referente às características e funcionamento do edifício em estudo. Para tal foram efetuadas visitas regulares ao respetivo edifício e à Camara Municipal de Rio Maior durante os meses de Janeiro e Fevereiro de 2015, com a devida cooperação das entidades responsáveis. As principais informações recolhidas e necessárias ao desenvolvimento do estudo em questão são as identificadas nos pontos seguintes:

- Plantas de arquitetura, cortes e pormenores construtivos, alçados e mapas dos vãos exteriores;
- Memória descritiva e projetos de instalação dos sistemas de climatização e ar condicionado;
- Projetos de luminotecnia referentes à data do projeto
- Utilização dos espaços: ocupação, iluminação e equipamentos instalados;
- Horário de utilização de espaços;
- Histórico de consumos de eletricidade e gás natural através de faturas energéticas referentes aos anos de 2012, 2013 e 2014.

Apesar de ter sido possível recolher um grande número de dados relevantes relativos ao edifício e ao seu funcionamento, é importante mencionar que não foi possível obter um histórico de consumo e utilização relativo ao sistema de climatização e ar condicionado. O edifício em estudo não possui instalado qualquer *software* que em que seja possível obter essa informação. Como tal, a informação referente a este ponto foi recolhida apenas com base em inquéritos e relatos dados pelos funcionários.

Também os horários de ocupação e utilização de equipamentos são baseados em descrições feitas pelos colaboradores do espaço ou em médias obtidas com recurso ao histórico de anos anteriores. Por se tratar de uma biblioteca municipal, com livre acesso à população, é difícil estimar valores exatos, uma vez que a afluência a este espaço se altera mensalmente e consoante fatores inidentificáveis.

6.2. Nota histórica

No pós-guerra de 1950, pela mão sábia e empreendedora do Doutor Alexandre Laureano Santos constrói-se a primeira biblioteca no concelho de Rio Maior.

A 13 de Julho de 1981, a biblioteca é reinaugurada num novo espaço já com a designação de Biblioteca Municipal Dr. Alexandre Laureano Santos. Virada prioritariamente para a juventude a Biblioteca ganha de novo um renovado fôlego, no entanto, as suas instalações ainda não apresentam as características específicas para o exercício das suas funções.

Finalmente, com o novo século inicia-se o processo de transferência para o novo edifício, construído de raiz e especificamente para a função a que se destina: a de Biblioteca Pública. A 1 de Dezembro de 2001 é então inaugurada a nova Biblioteca Municipal Dr. Laureano Santos (BMLS) situada na Rua Dr. Fernando Sequeira Aguiar, ilustrada na Figura 16. Este novo espaço dispõe de múltiplas valências e presta homenagem a um dos grandes homens de letras do país, dispondo de uma sala de leitura intitulada – Sala Poeta Ruy Belo. Atualmente, a Biblioteca disponibiliza um acervo de 30000 mil documentos e conta com cerca de 7500 utilizadores (Lopes 2014).



Figura 16 – Vista frontal da Biblioteca Municipal Laureano Santos

6.3. Descrição do edifício

Localizado em zona urbana na cidade de Rio Maior, distrito de Santarém, trata-se um edifício com uma área útil de 1330,30 m² estando por isso enquadrado no Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto que define “*Grande edifício de comércio e serviços*» ou «*GES*», o edifício de comércio e serviços cuja área interior útil de pavimento, descontando os espaços complementares, iguale ou ultrapasse 1000 m², ou 500 m² no caso de centros comerciais, hipermercados, supermercados e piscinas cobertas”.



Figura 17 - Vista aérea da cidade Rio Maior com destaque para a localização da BMLS (Bling Maps 2015)

Quanto à orientação, o edifício tem como coordenadas 39°20"N de Latitude e 8°56"O de Longitude. Relativamente à elevação, este encontra-se a aproximadamente 66 metros e a uma distância de 28 km do litoral. Estes dados foram obtidos com recurso ao *software Google Earth*. Tal como apresentado na Figura 17, o edifício está inserido na zona urbana da cidade de Rio Maior e é exposto a sombreamentos externos em pelo menos uma das suas fachadas.

De modo geral, o edifício em causa é constituído por 2 pisos. Praticamente toda a sua área do lado Oeste apresenta um único piso com pé direito elevado, cerca de 6.5m, tendo apenas numa das salas

um pequeno *mezanino* utilizável, visível na Figura 18. A restante área apresenta um pé direito aproximado de 5.3m em um único piso, piso 0, com exceção da área técnica situada no piso 1, onde se encontram todos os equipamentos de climatização e ventilação do edifício.



Figura 18 - Vista interior de zonas integrantes da BMLS: secção infantil (no topo), sala dos adultos (em baixo)

A Biblioteca Municipal Laureano Santos é constituída por 2 áreas gerais, serviços internos e serviços públicos. Os serviços internos são constituídos pelos gabinetes e áreas técnicas onde se situam os postos de trabalho da maior parte dos profissionais responsáveis pelo funcionamento e gestão da Biblioteca. Os serviços públicos correspondem a áreas de livre acesso para utilizadores. Ao todo o edifício é composto por 6 gabinetes/salas de reunião, 2 salas de leitura de elevada dimensão (Figura 18), 3 áreas destinadas a conferências/exposições, 1 depósito de material e as restantes zonas são destinadas à manutenção do edifício e aos seus equipamentos.

7. Metodologia

7.1. Processos de análise

Tal como foi mencionado acima, a primeira etapa do trabalho consistiu na recolha de toda a informação que caracteriza o edifício. Seguidamente passou-se à construção do modelo que iria ser simulado em três condições distintas: em condições reais, condições previstas e condições de referência. No primeiro caso o modelo foi simulado segundo as condições reais e exatas de funcionamento do edifício, e os resultados obtidos foram confrontados com os valores apresentados nas faturas energéticas para que pudessem ser ajustados e validados. O segundo modelo simulado foi o modelo em condições previstas, onde alguns aspetos são alterados de acordo com a legislação em vigor referente à certificação energética, tal como aconteceu no terceiro modelo, o modelo de referência. Obtidos os resultados referentes a estes dois últimos modelos determinou-se a classe energética, tal como referido no capítulo 3.2.

Posteriormente foram determinadas possíveis medidas a adotar para a melhoria do desempenho energético e térmico do edifício, que passaram pela aplicação de coberturas verdes e pela produção renovável com recurso a painéis solares. Finalmente, foi analisado o contributo dessas medidas para o desempenho do edifício. A Figura 19 seguinte ilustra as várias etapas do processo.

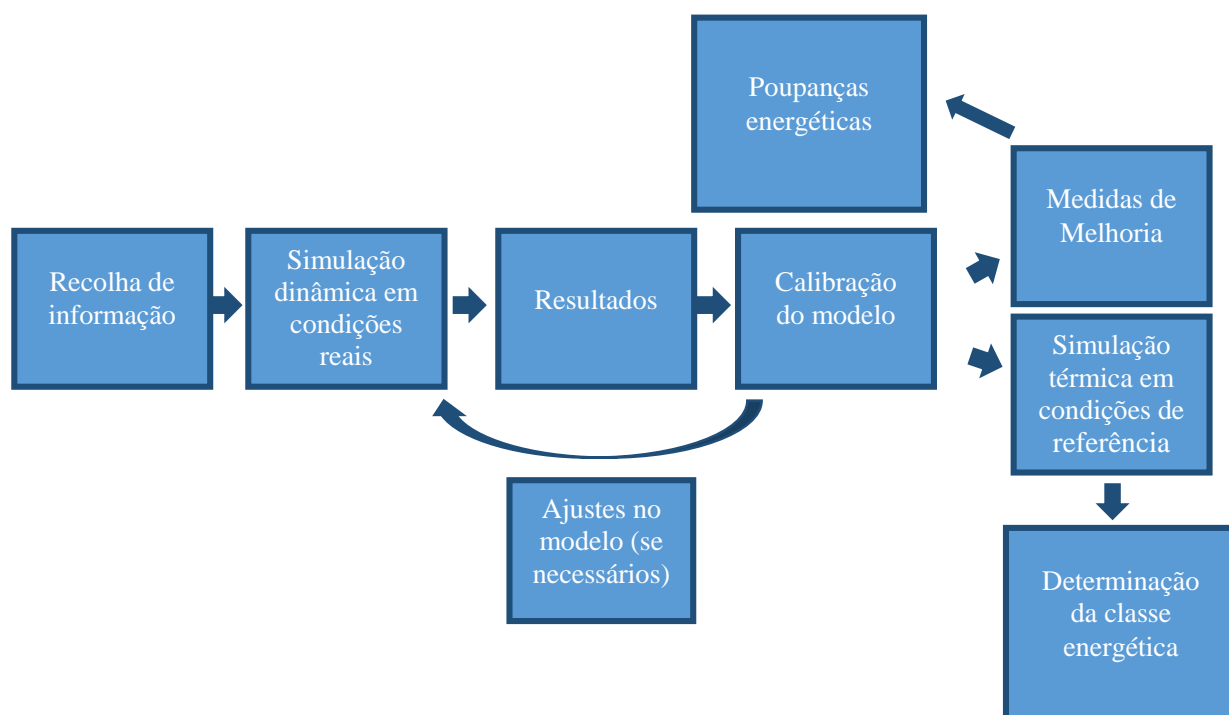


Figura 19 – Esquema ilustrativo da metodologia adoptada para análise de consumos do edifício

7.2. Modelação do modelo real

Tal como foi referido no capítulo 4, o *software* utilizado para o desenvolvimento das simulações foi o *EnergyPlus*. A geometria, por sua vez, foi feita no programa *Google Sketchup* onde foram introduzidas todas as características e atribuídos nomes a cada uma das superfícies para que

pudessem ser corretamente identificadas no IDF Editor. O edifício foi dividido em zonas térmicas, ou seja, zonas que apresentam características e comportamentos térmicos idênticos. O critério é o de criar um número de zonas reduzido mas sem utilizar simplificações grosseiras. Estas podem ser criadas por espaços individuais, da união de vários espaços adjacentes, ou pode mesmo acontecer que espaços de grandes dimensões possuam manifestas assimetrias (por exemplo, por exposição solar ou distribuição ganhos internos) e se fracionem em mais do que uma zona térmica.

No total, depois de feitas agregações e separações necessárias, o modelo foi dividido em 23 zonas térmicas tal como exemplificado na Figura 20. As zonas a verde são de livre acesso aos utilizadores, e as áreas reservadas apenas aos funcionários da biblioteca são as indicadas a azul. A amarelo estão discriminadas as instalações sanitárias.

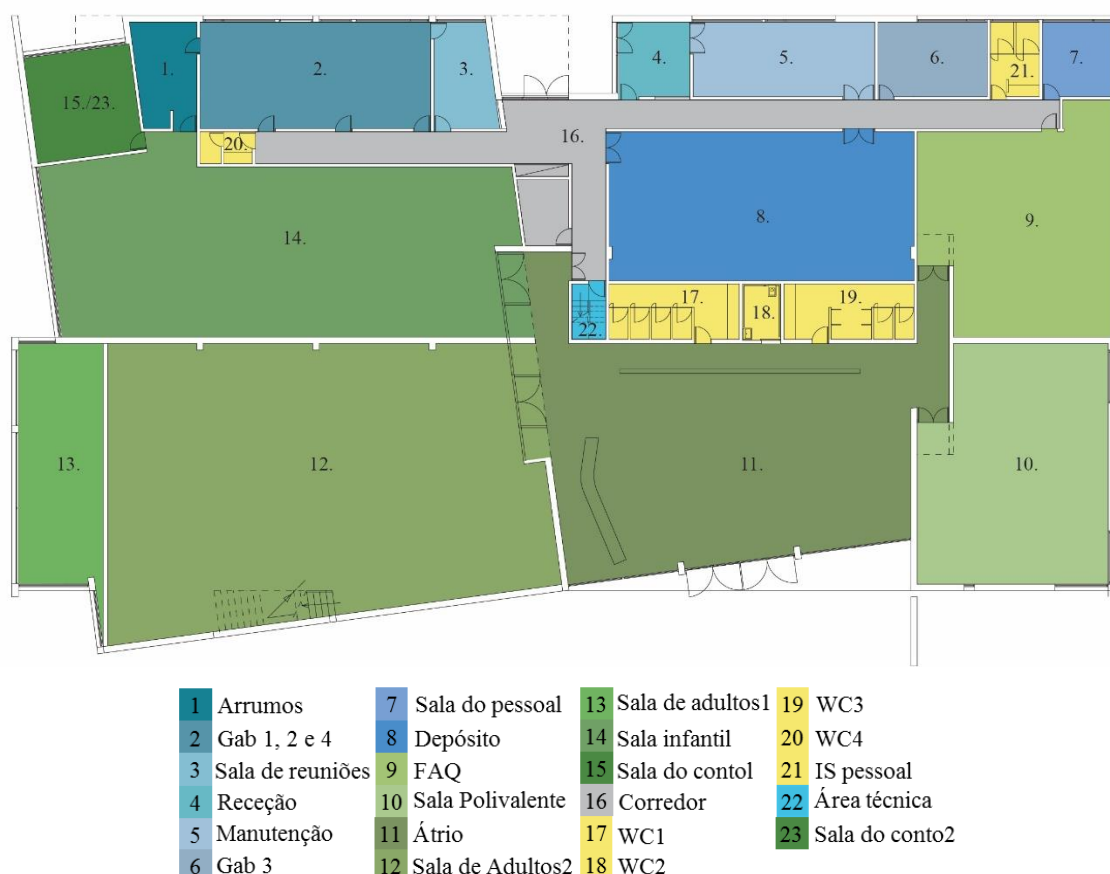


Figura 20 – Planta da BMLS e respectiva divisão em zonas térmicas

Houve a necessidade de agregar e separar espaços: a zona térmica 2 é originalmente composta por três espaços que se fundiram em uma só zona; as zonas 15 e 23 percentem ao mesmo espaço sendo que foi necessário que se desagregassem para uma correcta construção do modelo; as zonas 12 e 13 pertenciam também inicialmente ao mesmo espaço, no entanto, apresentavam comportamentos térmicos distintos. Para ambos os casos foi feita uma pequena análise local para que se comprovassem as diferenças ou igualdades entre os espaços. A planta original pode ser consultada no Anexo B.1.

Para a obtenção do ficheiro climático, foi utilizada a aplicação CLIMAS-SCE-Software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios disponibilizado pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia). Através do preenchimento de alguns campos, foi possível gerar um ficheiro “.EPW” (ESP-r/EnergyPlus Weather format) com os dados climáticos referentes ao município de Rio Maior.

A envolvente foi definida através do preenchimento dos campos referentes à espessura, rugosidade, condutividade, densidade e calor específico e a constituição das várias soluções construtivas existentes é apresentada no Anexo B.2. Também as absorptâncias térmicas e solares foram definidas para os elementos que faziam fronteira com o exterior.

Os vãos envidraçados representam 12% da área da fachada, encontram-se em contacto com o exterior e são de três tipos definidos também no Anexo B.2. Para estimar as propriedades dos vidros foi utilizado o programa *Window7.3* que dispõe de uma extensa base de dados.

Para os equipamentos foi considerada uma fração radiante de 30% (DOE 2013) e as potências atribuídas a cada equipamento são as indicadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Potência associada aos equipamentos elétricos

Equipamento	Potência (W)	Referência
Computador fixo	320	(Verificação in situ)
Computador portátil	107	(ASHRAE Handbook- Fundamentals 2009)
UPS	1200	(Verificação in situ)
Fotocopiadora	1440	(ASHRAE Handbook- Fundamentals 2009)
Máquina de Snacks	1800	(BIANCHI n. d.)
Chaleira Elétrica	1000	(Verificação in situ)
Televisão	90	(EDP 2015)

A listagem inclui os equipamentos disponíveis aos utilizadores e aos funcionários. No edifício da biblioteca não são preparadas nem armazenadas refeições, de modo a que não existem equipamentos para efeito.

Relativamente à iluminação, foi considerada para o valor de 37% para a fração radiante (DOE 2013). A maior parte da iluminação existente é feita por luminárias que se encontram embutidas no teto falso, sendo que apenas existem duas zonas em que isso não acontece: uma delas tem os sistemas instalados à superfície, na outra a iluminação é feita maioritariamente por luz natural existindo sistemas instalados nas paredes laterais como forma de apoio em dias menos iluminados. A maior parte das lâmpadas existentes no edifício são do tipo fluorescente (cerca de 72%), sendo as restantes incandescentes (18%) ou halogéneas (10%). Tal como aconteceu com os equipamentos elétricos também aqui foi definido um perfil de utilização que procurou aproximar-se da realidade. Para isso foram criados vários horários de utilização uma vez que a iluminação não é ativada de forma automática, mas sim conforme as necessidades.

O edifício tem um horário de utilização que, de modo global se aproxima do horário de expediente convencional, ou seja, funciona de segunda a sábado, das 9h às 18h. Em contexto anual a biblioteca apresenta uma média de 56 utilizadores diários, sendo que aproximadamente 50% permanecem no átrio, 30% dirigem-se à sala de adultos e os restantes 20% procuram a sala das crianças. No entanto, os vários locais que compõem o edifício apresentam perfis de utilização que variam entre si, e que variam consideravelmente ao longo do ano.

Quanto ao nível de atividade, considerou-se ser o equivalente a trabalho de escritório. Para a determinação do valor correspondente, fez-se uma média dos vários valores presentes no documento *Input/Output Reference* do *EnergyPlus* e adotou-se o valor de 120 W/pessoa.

Os perfis de utilização de equipamentos e iluminação, bem como o perfil de ocupação do edifício foram definidos segundo as informações disponibilizadas pelos funcionários tentando que se aproximassem o mais possível a realidade. É importante referir que os horários no *EnergyPlus* são estabelecidos em ciclos de 24h e para o período de um ano, através do objeto *Schedule:Compact* do *IDFEditor*, onde aliás são estabelecidos todos os horários e perfis de funcionamento.

Para climatizar o edifício, é utilizado um sistema autónomo gás/eletricidade do tipo *RoofTop*. É um sistema conjunto onde o aquecimento é feito com recurso a gás e o arrefecimento a eletricidade, constituído por três unidades de tratamento de ar colocadas no exterior do edifício

Para que se pudessem obter as necessidades de aquecimento e arrefecimento, a indicação de funcionamento do sistema de climatização foi feita nos grupos *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem*, e no grupo *ZoneControl:Thermostat* foram definidas as temperaturas associadas ao termostato para a estação de aquecimento, entre 24°C e 26° C. As três unidades de tratamento de ar (UCA1, 2 e 3), alimentam as diferentes zonas do edifício e apresentam perfis e horários de utilização que variam entre si. É necessário fazer a ressalva de que no edifício em questão somente o aquecimento é ativado de forma regular para um período definido. Quanto ao arrefecimento, apenas é acionado em situações extremas, de modo que para efeitos de cálculo as suas cargas não foram contabilizadas.

Depois de todo este processo, passou-se ao tratamento de dados, onde as necessidades foram divididas pela eficiência térmica no caso das cargas de aquecimento. Caso existissem, as cargas de arrefecimento seriam, por sua vez, divididas pelo valor do COP (*Coefficient of Performance*).

O caudal do sistema de ventilação foi definido recorrendo ao projeto de ventilação. Por se tratar de um local de armazenamento de documentos, o caudal de insuflação é geralmente superior ao de extração, fazendo com que a maior parte das zonas se encontre em sobrepressão (TRANE 2002), tal como é exemplificado na Figura 21. Este facto faz com que haja uma diminuição da humidade e de poluentes no interior do edifício, numa tentativa preservar documentos que existam no seu interior.

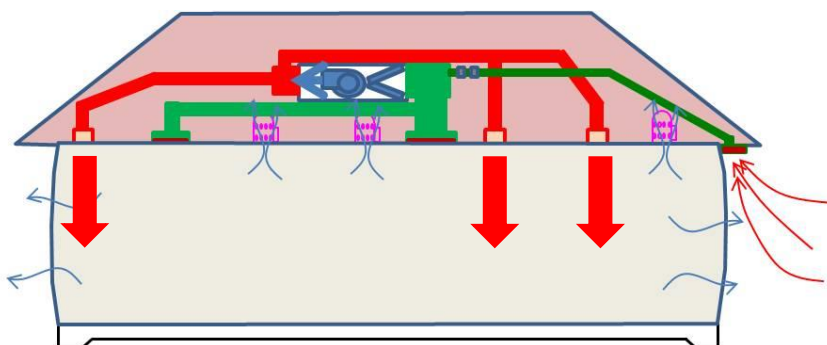


Figura 21- Esquema ilustrativo de um compartimento em sobrepressão, adaptado de (America et al. 2015)

Por consequência, definiu-se um caudal de infiltração de 0,6 RPH nos horários em que o sistema de climatização não está a funcionar e de 0 RPH quando efetivamente está. Esta abordagem apenas foi diferente para uma das zonas, o átrio, que corresponde à zona de entrada e saída dos utilizadores da biblioteca, onde foram definidas 1 RPH no horário de não climatização e 0,6 RPH no horário de climatização.

Para além da distribuição de ar associada ao sistema de climatização (horário de funcionamento que corresponde as necessidades para aquecimento e arrefecimento), existem ainda ventiladores de extração de ar, nomeadamente nas instalações sanitárias.

De um modo geral, foram estes os princípios adotados na elaboração do modelo real, como outputs foram então pedidos as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, bem como o consumo elétrico associado aos equipamentos elétricos e à iluminação.

7.3. Modelação dos modelos previsto e de referência

Segundo a legislação, a área de vão envidraçado terá de ser igual ou inferior a 30% da área total da fachada e a 0% das coberturas do edifício. Como essa condição não se verificava, foram feitos os ajustes necessários para diminuir a área de envidraçados, de modo a que se atingissem assim os valores necessários. O fator solar foi também alterado, adotando-se o valor 0.15 indicado pelo regulamento para a zona climática V3.

Os valores de caudal de ar novo foram determinados com recurso ao método prescritivo, com uma eficácia de 80%. As características referentes aos equipamentos de climatização sofreram alterações nomeadamente no que respeita ao valor das suas eficiências, tanto em aquecimento como em arrefecimento consoante a sua classe, que foi também determinada pelo regulamento. O valor de eficiência (potencia específica SFP) associada aos ventiladores de extração e insuflação foi de 2000 W/(m³/s). As condições interiores mais uma vez se mantiveram na gama 20 °C a 25° C, e os valores usados na simulação foram os apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Classificação de desempenho de referência dos diferentes sistemas segundo o RECS

Aquecimento	Caldeira	Classe B	EER=2.7
Arrefecimento	Chiller	Classe C	$\eta=86\%$

Finalmente, quanto à iluminação foram respeitados os valores mínimos de luminosidade exigido pela legislação portuguesa e pela EN 12464-1 (Tabela 7).

Tabela 7 – Densidade de Potência de iluminação para cada zona do edifício.

Tipologia	Densidade de Potência (W/m²)
Sala Infantil	14
Sala Adultos	14
Átrio	4.5
F.A.Q.	2.8
Gabinetes	14
Sala do Pessoal	9
Sala Polivalente	14
Sala do Conto	8.4
WC's	9
Depósito	8
Arrumos	8
Área Técnica	6
Corredor	4.5

7.4. Método de análise do modelo de coberturas verdes

Depois de avaliado o comportamento energético do edifício foram testadas medidas de melhoria, uma delas foi a implementação de coberturas verdes. Tal como foi dito anteriormente, todos os testes foram feitos utilizando a ferramenta de simulação EnergyPlus.

O primeiro passo passou por definir que tipo de coberturas iriam ser efetivamente estudadas, tendo em conta os três tipos de coberturas verdes definidas no capítulo 5.1. Optou-se pelas coberturas extensivas e semi-intensivas. Não foram realizadas simulações para coberturas intensivas uma vez que para a utilização deste tipo de coberturas são muitas vezes necessários estudos adicionais

relacionados com a capacidade de suporte, através uma análise detalhada da estrutura da cobertura existente. Outro motivo assenta no facto de que são coberturas que exigem muita manutenção e sistemas de rega sofisticados. Uma vez que não foram efetuados os estudos necessários e não é desejável que o sistema necessite de muita manutenção devido à falta de acessos às zonas de implementação, esta opção não foi estudada.

Posto isto, foram definidos os parâmetros de entrada para o EnergyPlus referentes a cada uma das duas coberturas jardim em estudo. Os valores usados são os apresentados na Tabela 8. Os restantes parâmetros utilizados na simulação foram definidos na Tabela 3 do subcapítulo 5.1.4.2.

Tabela 8 - Parâmetros introduzidos no EnergyPlus

	Cobertura Extensiva	Cobertura Semi-intensiva
Altura da Vegetação [m]	0.05	0.5
Índice de Área Foliar [-]	1	2.5
Espessura do Solo [m]	0.1	0.35

A altura da vegetação foi determinada tendo por base a gama de valores apresentada por Sailor (2008) que, definiu que para os tipos de cobertura verde em estudo, a altura da vegetação varia entre 0.01 m e 1.0 m. No presente trabalho foi definido o valor 0.05m para a cobertura extensiva uma vez que o objetivo seria a implementação de plantas típicas e perfeitamente adaptadas ao clima português. Temos como exemplo o alecrim e o azevinho, caracterizadas como plantas de pequeno porte e manutenção reduzida. Para o tipo semi-intensiva, adotou-se o valor 0.5, valor central da gama proposta pelo autor no seu estudo, tal como acontece com este tipo de cobertura que se apresenta como intermediária entre os 3 tipos de cobertura verde. Para o índice de área foliar foi usado o mesmo critério. Finalmente, a espessura do solo foi definida tendo em conta coberturas existentes, presentes em (Cristina et al. 2014).

De modo geral, as camadas construtivas de uma cobertura verde são as apresentadas na Figura 7. Na Figura 22 podemos observar um esquema que ilustra as camadas existentes e as camadas efetivamente simuladas uma vez que o EnergyPlus apenas permite a modelação das duas primeiras camadas apresentadas na figura b), vegetação e solo. Como tal, foi criada uma camada construtiva adicional de 0.1 m de brita, na tentativa de simular o comportamento da camada de drenagem, com base em medições efetuadas em coberturas verdes já implementadas.

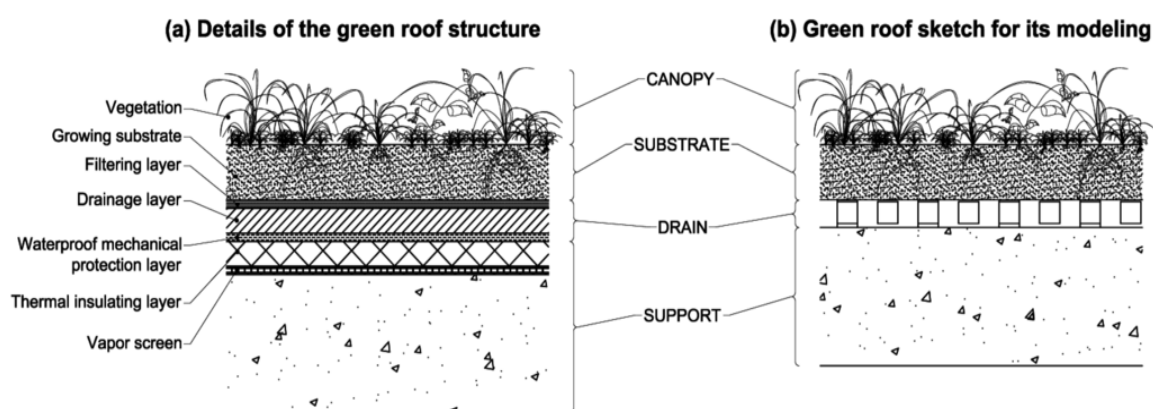


Figura 22 – Camadas construtivas de uma cobertura verde: a) estrutura tradicional, b) tidas em conta na simulação (Rakotondramiarana et al. 2015)

As camadas de proteção são compostas por elementos relevantes para um favorável desempenho do sistema. No entanto, não apresentam uma influência considerável no desempenho térmico do sistema

uma vez que são geralmente constituídas camadas muito finas e pouco significativas para as equações de fluxo de calor, contrariamente ao que acontece sistema de drenagem.

Uma vez que estamos a lidar com organismos vivos, a água é um fator essencial ao metabolismo das plantas. Os dados referentes às condições climáticas, mais concretamente à precipitação, são apresentados no subcapítulo seguinte, no entanto, é natural que existam períodos em que a rega proveniente da precipitação natural não seja suficiente ou seja mesmo inexistente. Para esses períodos foi adotado o valor de 6mm/dia sugerido por Cudell em (Cudell 2000), como indicador de humidade mínima do solo. Calendarizou-se este valor para dias do ano em que o teor de humidade do solo fosse inferior a 40%, de acordo com o modelo definido por Sailor em (Sailor 2008). Deste modo, dependendo das necessidades da planta, há sempre um modo de manter as condições hídricas necessárias evitando gastos desnecessários de água através dos sistemas de rega.

Para a realização da simulação, a cobertura verde foi aplicada a toda a área de cobertura disponível e com possibilidade de acesso. Para uma área total de cobertura de 1354.3 m², as coberturas verdes foram implementadas em 1150.7 m² que corresponde a 85% da área total.

7.4.1. Condições climáticas do local

As condições climáticas do local e a sua correta análise são outro fator determinante para o desempenho energético dos edifícios e das suas soluções construtivas. Como tal, nesta subsecção são descritas as condições climáticas típicas da cidade de Rio Maior, onde se situa o edifício em estudo. Os valores da temperatura do ar e a radiação solar são as que constam do ano típico considerado no ficheiro climático de Rio Maior. Os valores de precipitação foram adquiridos no Boletim Meteorológico para a Agricultura disponível no portal da internet do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IMPA).

7.4.1.1. Temperatura e radiação

A temperatura do ar exterior e a radiação solar do local são os principais fatores que determinam os fluxos de calor existentes nas coberturas bem como o comportamento das plantas. A Figura 23 e a Figura 24 apresentam os valores diários da temperatura máxima, mínima e média, e a radiação solar média e máxima durante um ano para a zona em questão. Foram estes os valores usados em toda a dissertação.

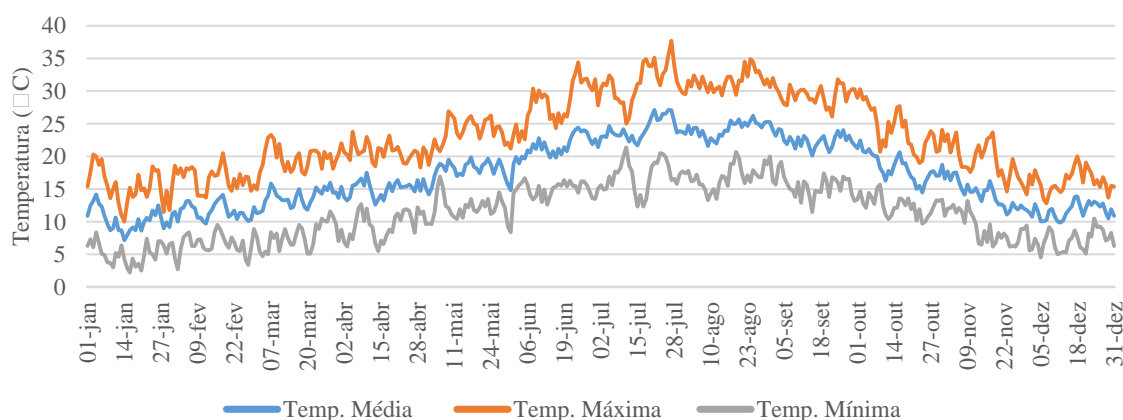


Figura 23 – Temperatura exterior máxima, mínima e média para um ano típico na cidade de Rio Maior

Para um ano típico, a temperatura máxima absoluta é de 37.7 °C registada no dia 27 de Julho. A temperatura mínima absoluta é 2.2 °C registada no dia 16 de Janeiro.

Tal como foi dito anteriormente a radiação solar tem um efeito importante nas coberturas, nomeadamente nas coberturas verdes tal como Sailor (2008) evidenciou no seu modelo, uma vez que representa a fonte de energia de processos como a fotossíntese das plantas e a evapotranspiração.

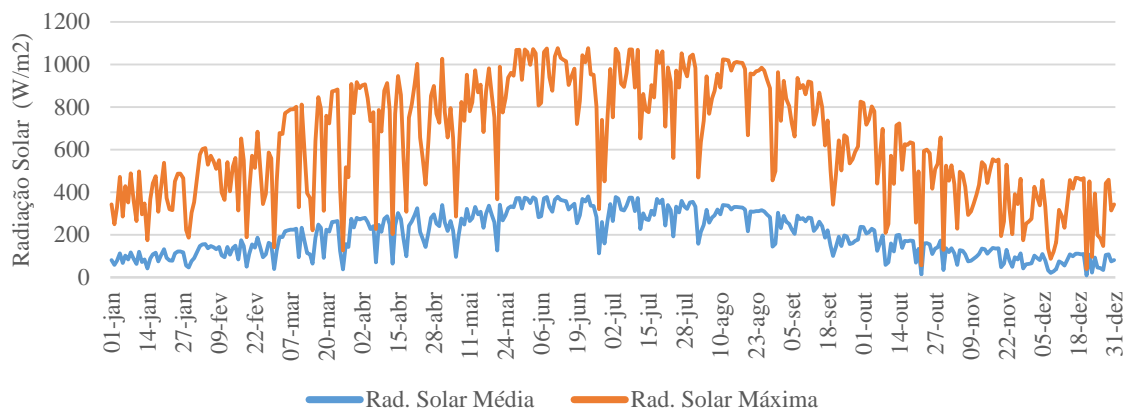


Figura 24 – Radiação solar média e máxima para um ano típico na cidade de Rio Maior.

O dia com índice solar radiativo mais elevado foi registado no dia 23 de Junho, apresentando o valor 1076 W/m².

7.4.1.2. Precipitação

A quantidade de água no solo tem uma influência considerável no comportamento das plantas e por consequência no consumo de energia do edifício quando são aplicadas coberturas verdes. Uma vez que o ficheiro climático do EnergyPlus não possui informação referente à precipitação, foi necessário determiná-la com recurso à informação disponibilizada no portal do IPMA. A informação disponibilizada é de carácter anual e referente ao ano de 2014, sendo apresentadas três medições decendiais de precipitação para cada um dos doze meses do ano.). O resultado é o apresentado na Figura 25 para uma precipitação total anual de 760 mm.



Figura 25 – Dados médios de precipitação para a cidade de Rio Maior

7.5. Método de análise do potencial fotovoltaico do local

A determinação do potencial fotovoltaico do local passou por diferentes fases. Primeiramente precedeu-se à recolha de informação de cariz físico, geográfico e tecnológico. Para a determinação do potencial físico do local, recorreu-se à ferramenta PVGIS que disponibiliza dados referentes à irradiação anual do local por unidade de área. Através de visitas às coberturas do edifício e da informação disponibilizada referente às dimensões do edifício, determinou-se o potencial geográfico ou seja, a área de implementação disponível e mais indicada para o efeito. Por fim, procedeu-se à avaliação do potencial técnico através da escolha dos componentes do sistema fotovoltaico. As características referentes ao módulo escolhido, são as apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais características referentes ao módulo fotovoltaico utilizado (Renewables S.A. 2014)

Módulo	Open 250-PQ60 (silício policristalino)
Área (m ²)	1.64
Potencia (Wp)	250
Eficiência (%)	15.30
Impp (A)	8.45
Vmpp (V)	29.90
Isc (A)	8.95
Voc (V)	37.75

Foi escolhido este painel devido à relação preço/qualidade e ao facto de ser um produto nacional e disponível no mercado. Ao longo do processo foram definidas determinadas condições, apresentadas nos seguintes pontos:

- Foi adoptada uma distância entre fileiras de 1.45 m e uma distancia de segurança de 1 m nos limites da cobertura;
- Foi determinada, com recurso ao programa SolTerm, uma percentagem de perdas anual devido ao sombreamento causado pelos edificios adjacentes à biblioteca. Foram efectuadas as medições necessárias para a obtenção dos ângulos necessários ao cálculo das obstruções solares em SolTerm. Os ângulos necessários são os ilustrados na Figura 26. Posteriormente estes valores foram inseridos no SolTerm (Figura 27) e determinou-se que as perdas associadas ao sombreamento, seriam aproximadamente 17%;

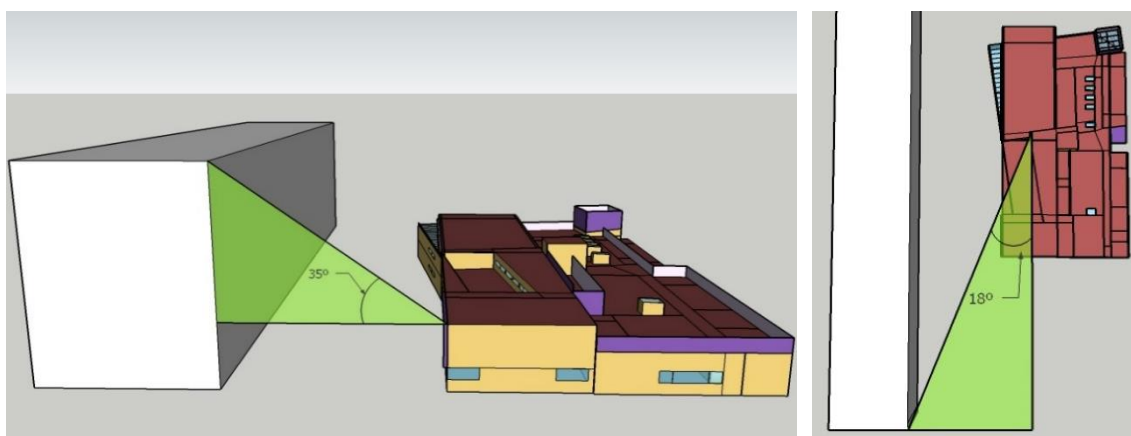


Figura 26 - Esquema ilustrativo dos ângulos necessários à determinação da percentagem de sombreamento

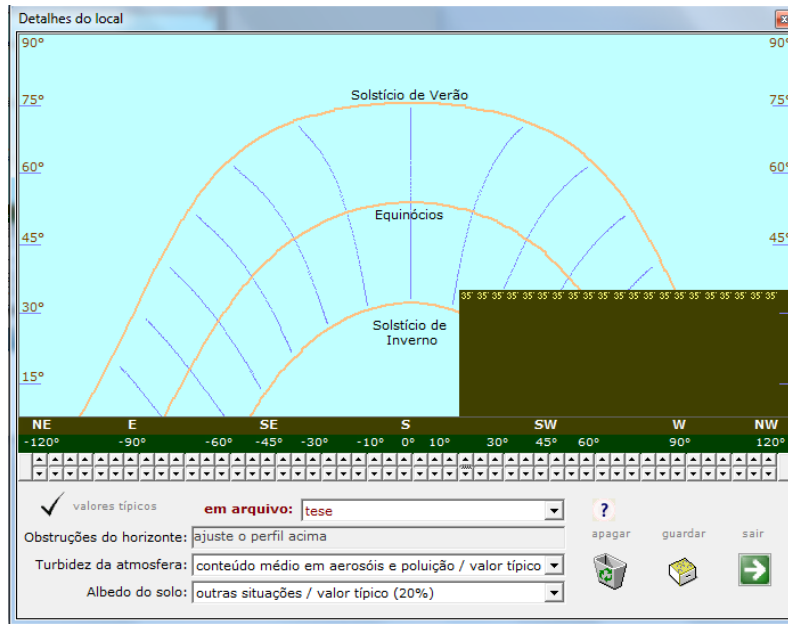


Figura 27 - Interface SolTerm para obtenção das obstruções radiativas

- Foram também tidas em conta as perdas associadas aos restantes equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico e aos factores externos (cabos, inversores, temperatura, radiação, reflexão), e avaliadas em 12% segundo um operador de mercado.

Depois de recolhidos e analisados os dados referentes à radiação solar e tendo em conta os aspectos anteriormente mencionados, determinou-se a produção fotovoltaica com recurso à seguinte equação:

$$E_{pv} = I \times A_{painel} \times \eta_{módulo} \times \eta_{sistema} \quad (8)$$

em que:

$$\eta_{sistema} = \eta_{equipamento} \times (1 - Perdas_{sombreamento}) \quad (9)$$

Sendo I a irradiância anual obtida com recurso ao PVGIS, $A_{módulo}$ a área total dos módulos fotovoltaicos e $\eta_{módulo}$ a eficiência referente a eles. $\eta_{sistema}$ foi determinada com recurso à equação 9, em que $\eta_{equipamento}$ corresponde à eficiência do equipamento e toma o valor de 88% (sabendo que as perdas são de 12%) e que $Perdas_{sombreamento}$ se refere às perdas provocadas pelo sombreamento.

Os painéis foram depois organizados em série (*string*) e em paralelo, e posteriormente, tendo em conta as características do módulo; foi verificada a sua compatibilidade com as características do inversor. Este estudo foi efectuado com recurso ao *Sunny Design Web* (SMA Solar Technology n.d.). Foi verificado o quociente entre a potência nominal do inversor e a potência pico dos módulos fotovoltaicos, definido como razão de potência nominal. O inversor escolhido foi o FLX PRO 15. Uma escolha correta pode ser avaliada com recurso a esse quociente: caso se encontre entre 0.89 e 1.35 (para o projecto em questão) é indicativo de que o inversor está a funcionar correctamente face à energia produzida. A razão de potência nominal obtida foi 0.89, que corresponde a um bom desempenho.

Toda a informação referente aos custos associados ao sistema, apresentados na Tabela 10, foi facultada pela empresa BoaEnergia, e os valores dizem respeito ao custo unitário dos aparelhos.

Desta forma, depois feito o dimensionamento e a contabilização de todas as unidades necessárias a cada sistema, estes valores podem sofrer alterações.

Tabela 10 – Custos associados aos componentes do sistema fotovoltaico

Componentes	Custo unitário
Módulo	140.70 €
Inversor	125.00 €
Cabos	53.60 €
Estrutura	70.00 €
Contador	295.00 €
Monitorizador	356.48 €
Instalação	100.00 €

O sistema foi dimensionado para que não existisse comercialização à rede de modo a que aproximadamente a totalidade da eletricidade produzida fosse utilizada no edifício, limitando a produção excedente. Na discussão de resultados referente à produção de energia fotovoltaica no edifício em questão, esta questão irá ser novamente abordada.

8. Análise de consumos

8.1. Calibração do modelo de simulação real e caracterização dos seus consumos

Recolhidos e reunidos todos os dados necessários, passou-se ao tratamento dos mesmos e à realização das simulações correspondentes. Essas simulações apresentam as respostas às questões colocadas nos capítulos anteriores.

A Figura 28 apresenta o modelo geométrico do edifício, executado em *Sketchup*

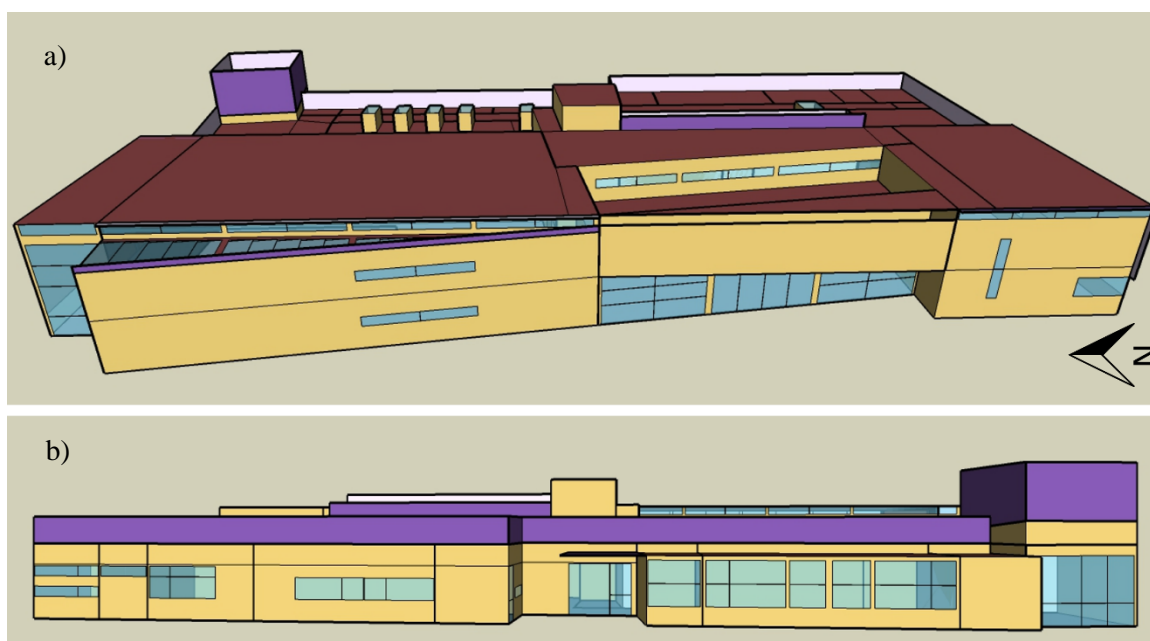


Figura 28 - Modelo geométrico do edifício da BMLS: a) vista frontal; b) vista traseira

Após a construção do modelo e definição da forma de utilização é possível simular o consumo do edifício em condições reais de utilização. Os resultados foram comparados com as faturas mensais de energia e para que existisse conformidade, foram feitos alguns ajustes - calibração -. O sistema de climatização, tal como foi dito anteriormente, funciona a gás para aquecimento e a eletricidade para arrefecimento. De 2013 para 2014, os horários de utilização do sistema de climatização, nomeadamente do aquecimento, sofreram alterações consideráveis. Como tal, optou-se para efeitos de calibração, por ter em conta apenas as faturas referentes ao ano de 2014 tanto para a climatização como para o consumo associado aos equipamentos elétricos. Na Figura 29 e Figura 30 são apresentadas as diferenças entre os valores simulados e os reais para o consumo anual de eletricidade e gás natural, respetivamente. A maior diferença percentual, 35%, verifica-se no mês de Fevereiro para o gás natural. Esta diferença pode ser justificada com o facto de ter sido feito um acerto na fatura por parte da entidade operadora, mas também porque aconteceram nesse mês, um grande número de eventos que implicam a climatização de espaços normalmente não utilizados. Nos restantes meses o consumo obtido por simulação apresenta-se idêntico ao consumo real não ultrapassando uma diferença de 10%. Em termos anuais obteve-se um desvio de 7% para a eletricidade, e de -9% para o gás natural.

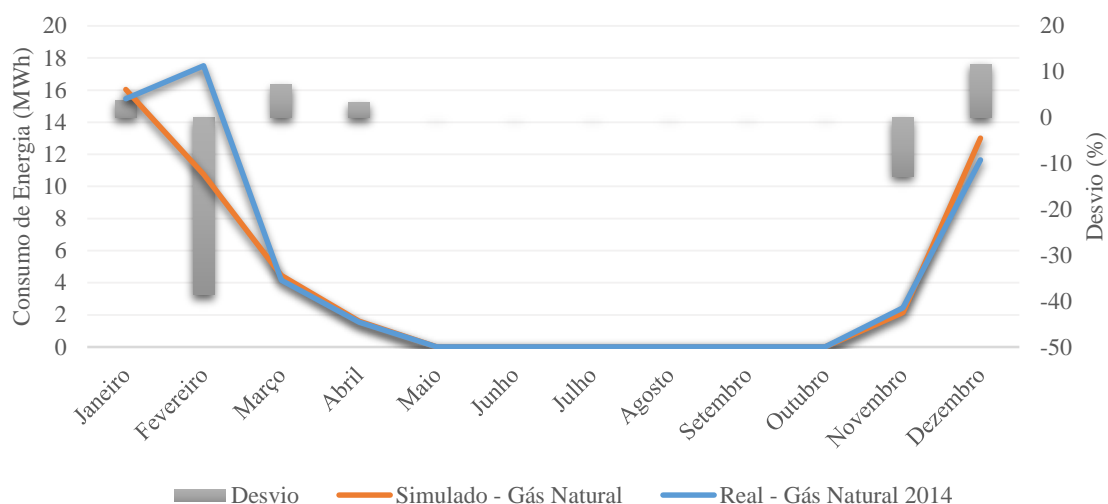


Figura 29 - Comparação entre consumos anuais reais e simulados de gás natural

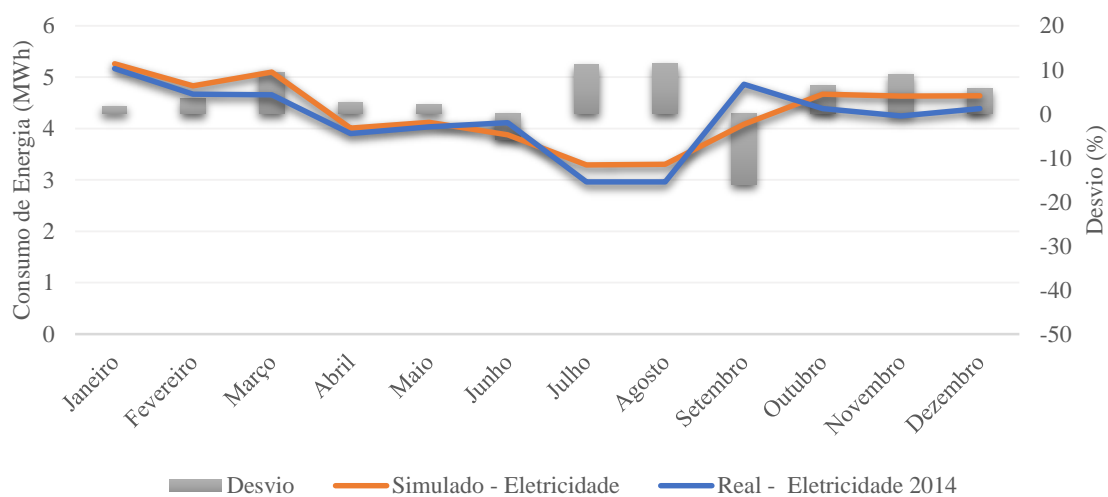


Figura 30 - Comparação entre consumos anuais reais e simulados de electricidade

Depois de feita a calibração do modelo, procedeu-se à análise da energia final consumida anualmente pelo edifício e os resultados obtidos são os apresentados na Figura 31:

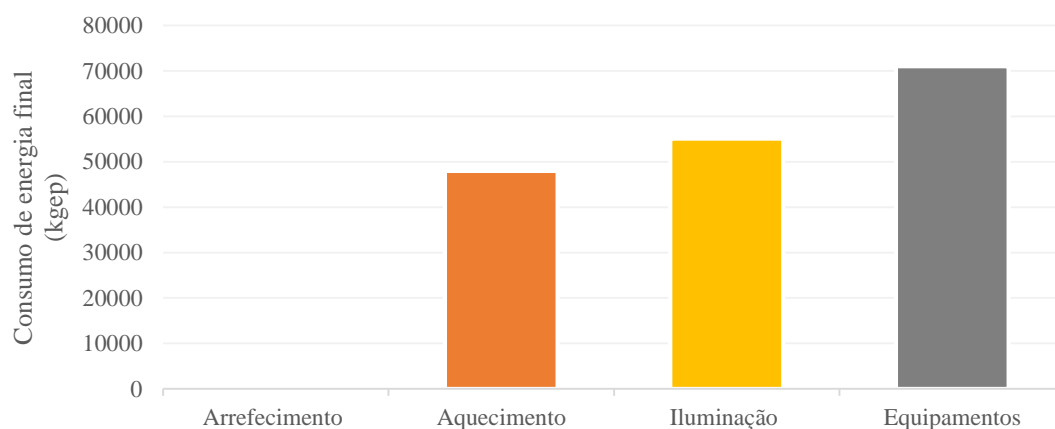


Figura 31 - Desagregação do consumo anual de energia final

A maior parcela pertence aos equipamentos, 41%. Uma vez que o edifício é bem provido de iluminação natural, a iluminação tem menor representatividade, 31%. Por outro lado, a energia dispendida em aquecimento (e só em aquecimento) apresenta alguma expressividade, 28% do total de energia final consumida em todo o edifício merecendo por isso algum destaque. Esta análise permitiu perceber com maior clareza quais os sectores que deveriam ser melhorados, através da aplicação de medidas comportamentais ou de novas tecnologias que possam tornar o edifício mais eficiente.

8.2. Análise de consumos em condições previstas e de referência

A Figura 32 apresenta a comparação de consumo de energia final anual para os três modelos, real, em condições previstas e em condições de referência.

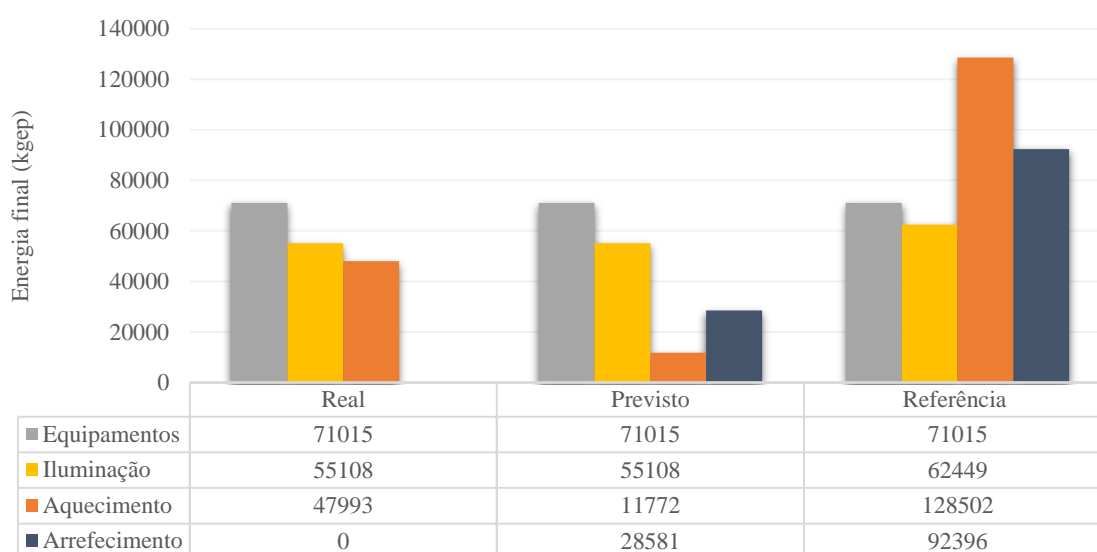


Figura 32 - Comparação do consumo anual de energia final para os três modelos em estudo (real, previsto e de referência)

Quanto aos equipamentos, não há qualquer tipo de referência a estes na legislação, posto isto, o consumo de energia que lhes é associado mantém-se nas 3 situações. A iluminação sofre um ligeiro aumento (13%) no modelo de referência, o que significa duas possibilidades alternativas: i) o sistema de iluminação atual é insuficiente ou ii) o edifício é bem dotado de iluminação natural, não necessitando da quantidade de iluminação artificial que seria de esperar tendo em conta as características construtivas do edifício. As cargas de aquecimento sofrem uma ligeira diminuição ao contrário do que seria de esperar, mas há várias razões para que isso aconteça, nomeadamente devido ao *setpoint* utilizado atualmente que é bastante superior ao normal (24°C – 26°C). Isto acontece porque, segundo informações recolhidas junto dos funcionários, o caudal insuflado no sistema de distribuição sofre perdas acentuadas, mas também pelo facto de que o mesmo equipamento alimenta espaços de dimensões muito variadas. Utilizar um *setpoint* elevado, é a solução adotada para manter as temperaturas interiores dentro dos valores ideais para o conforto dos utilizadores, fazendo aumentar consideravelmente os consumos. Nos restantes modelos, o mesmo não acontece, uma vez que os *setpoints* utilizados são os definidos no regulamento (20°C -25°C). Finalmente, quanto às cargas de arrefecimento, uma vez que são inexistentes no modelo real, sofrem consequentemente um aumento nos restantes modelos devido às condições impostas pela legislação.

8.3. Classe energética

Uma vez simulados e obtidos todos os resultados em condições previstas e de referência procedeu-se ao cálculo dos indicadores (IEE_{prev} e IEE_{ref}). Posteriormente foi calculado o rácio de eficiência energética (RIEE) com recurso à equação 5, através do qual foi feita a determinação da classe energética do edifício. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 11, onde se determinou a classe com recurso à correspondência apresentada na Figura 5. A classe obtida para o edifício é B, revelando que, de modo geral, o comportamento energético do edifício é muito satisfatório.

Tabela 11 – Indicadores de eficiência energética e respetiva classe energética obtida

IEE_{prev}	171
IEE_{ref}	310
RIEE	0.55
Classe	B

8.4. Medidas de Melhoria

No subcapítulo anterior procedeu-se à determinação da classe energética do edifício, e a conclusão foi de que atualmente, o edifício apresenta já um comportamento muito satisfatório. No entanto, é sempre benéfico obter melhores resultados e tendo em conta as características do edifício é possível fazê-lo. O passo seguinte passou por, por um lado, avaliar a viabilidade da aplicação de sistemas que promovam a redução das cargas associadas à climatização, e por outro verificar as mais-valias da aplicação de um sistema de produção de energia renovável para consumo próprio no edifício. No primeiro caso, foi estudada a aplicação de coberturas verdes, e no segundo a implementação de sistemas de produção de energia fotovoltaica. Os resultados obtidos são apresentados nas secções seguintes.

8.4.1. Coberturas Verdes

Como primeira medida de melhoria procedeu-se à aplicação de coberturas verdes em toda a área de cobertura disponível para o efeito. A área disponível é a apresentada a verde na Figura 33, perfazendo um total de aproximadamente 1145 m² que corresponde a 85% da área total de cobertura (1350m²).

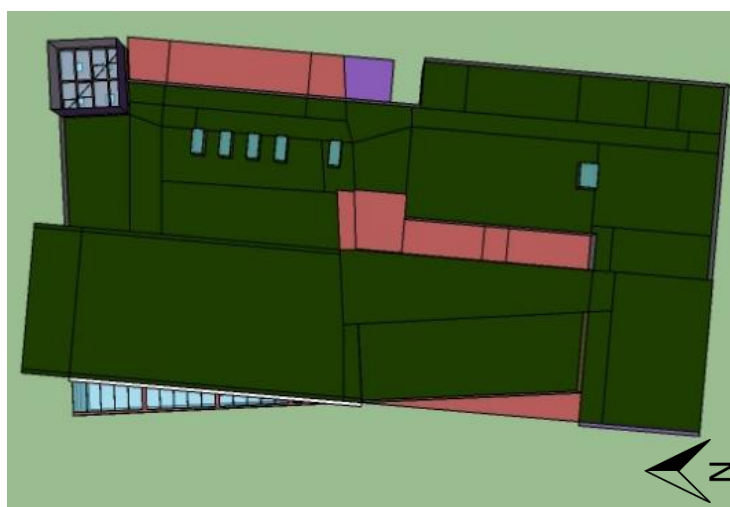


Figura 33 – Área de cobertura disponível para aplicação de cobertura jardim

Foi estudada a viabilidade da aplicação de dois tipos de coberturas ajardinadas, as extensivas e as semi-intensivas. Para isso, no modelo previsto, a solução construtiva referente a cada uma delas foi aplicada sobre a solução construtiva das coberturas existentes, na tentativa de se proceder à diminuição das cargas de aquecimento e arrefecimento e consequentemente à melhoria do desempenho energético do edifício. A Figura 34 apresenta uma comparação entre os consumos de energia iniciais – sem cobertura jardim - e finais – com cobertura jardim, para aquecimento (esquerda) e arrefecimento (direita).

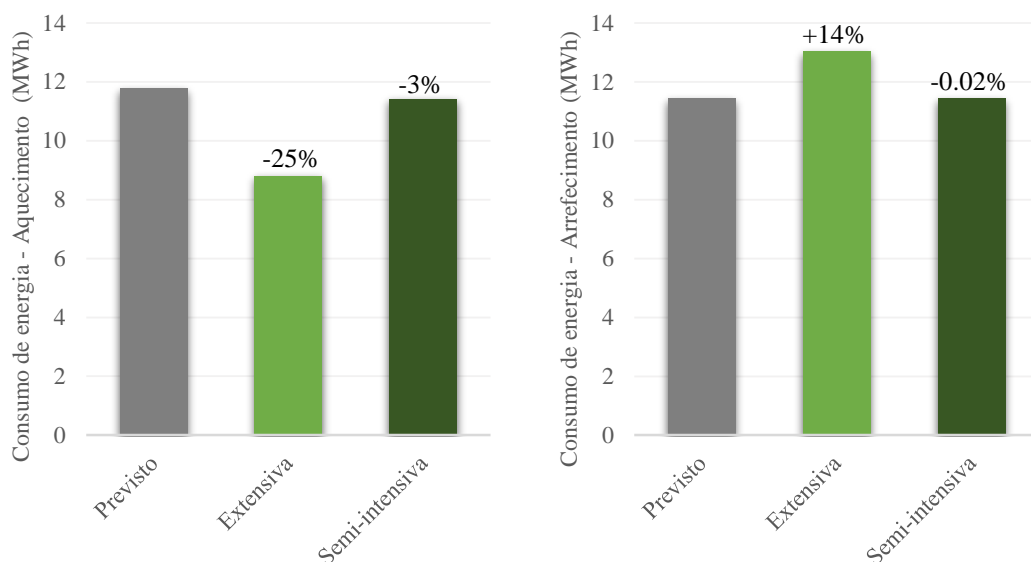


Figura 34 - Comparação entre consumos de energia para climatização no modelo previsto, com e sem coberturas verdes.

A aplicação da cobertura extensiva revelou-se como uma mais-valia na estação de aquecimento, com uma diminuição de consumos na ordem dos 25%, no entanto, no que toca ao arrefecimento esta não se apresenta como uma boa solução uma vez que o consumo do edifício sofreu um aumento de 14%. A cobertura semi-intensiva, por outro lado, apresenta resultados menos notórios tanto na estação de aquecimento, com uma diminuição de 3%, como na estação de arrefecimento em que os consumos de mantiveram praticamente inalterados (diminuição de 0.02%).

Os resultados apresentados foram obtidos mediante a aplicação das coberturas verdes sobre uma cobertura existente que apresenta já características que a torna mais benéfica quando comparada com a maior parte das coberturas tradicionais, as coberturas claras, que serão analisadas com maior pormenor em secções seguintes. Estas coberturas destacam-se devido ao seu alto poder refletivo, o que as torna benéficas durante a estação de arrefecimento. No Inverno por outro lado, a cobertura clara tem menos resistência térmica e menor capacidade absorvita, já as coberturas verdes apresentam processos que fazem com que a temperatura na sua superfície sofra um ligeiro arrefecimento, mais notório no caso das coberturas semi-intensivas.

Posteriormente procedeu-se à conversão da necessidade de energia em consumo de energia final. Na Figura 35 é apresentado o resultado obtido, que ilustra de forma mais clara a real viabilidade da aplicação destes sistemas.

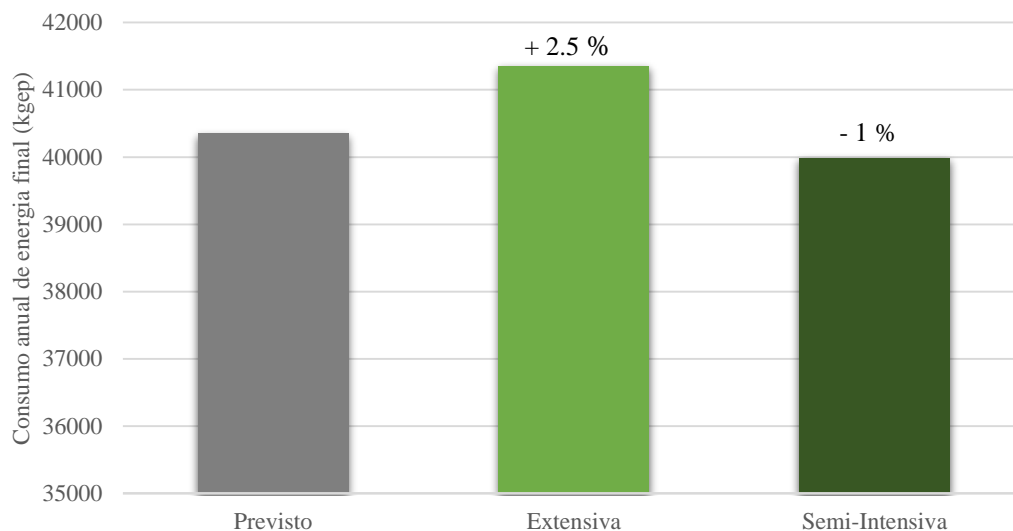


Figura 35 – Comparação entre consumos de energia final para climatização no modelo previsto, com e sem a aplicação de coberturas verdes

Constatou-se que, apesar de em algumas circunstâncias a aplicação destas coberturas ser benéfica, de modo geral, em termos de diminuição de consumo efetivo de energia, os resultados são pouco positivos com uma diminuição de apenas 1% da energia final consumida no caso da aplicação da cobertura semi-intensiva, ou mesmo negativos, verificando-se um aumento no consumo de energia de 2.5% para a cobertura extensiva, não alterando assim a caracterização energética do edifício.

É importante voltar a referir que estes resultados foram obtidos mediante a aplicação das coberturas ajardinadas no modelo previsto, que apresenta características definidas pela legislação quer ao nível da climatização quer ao nível da envolvente do edifício.

No capítulo 9 é novamente discutida e testada a aplicabilidade destas coberturas mas desta vez em modelo real. São também estudados com maior detalhe alguns dos fatores que influenciam de forma direta o comportamento das coberturas, e é feita a comparação entre os resultados obtidos com recurso à cobertura clara existente e às coberturas verdes.

8.4.2. Solar Fotovoltaico

Como segunda possível medida de melhoria, foi dimensionado um sistema de produção de energia solar. Com recurso à extensão *Skelion* do *Sketchup* foram determinadas as áreas de telhado com possível sombreamento provocado por interferências de superfícies aí existentes. Essas áreas estão assinaladas a cinzento na Figura 36, bem como as áreas ocupadas com outro tipo de equipamentos e portanto não utilizáveis, a vermelho. Depois de avaliada toda a área de cobertura definiu-se como possível área de implementação, a área marcada a verde correspondente a 370 m² e a 27% da área total de cobertura (1350 m²).

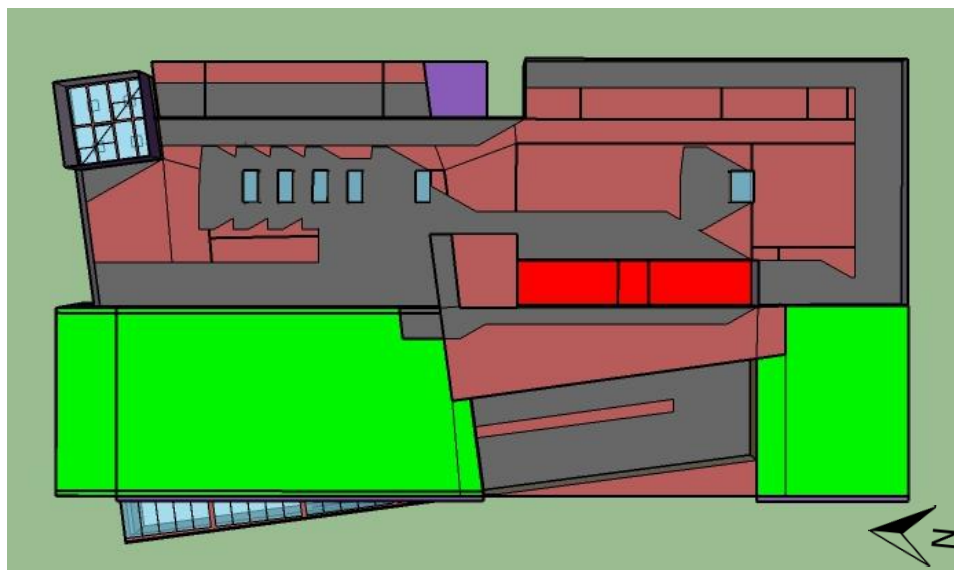


Figura 36 - Identificação e delimitação da área de cobertura disponível para a implementação do sistema fotovoltaico.
Vista aérea do edifício

Nesta fase, e visto que a classe energética atribuída ao edifício foi B, o objectivo principal foi determinar qual a potência a instalar para que fosse possível classificar o edifício com a classe energética superior. Com recurso à equação 5, foi determinado um valor de IEE_{ren} necessário para a obtenção de um RIEE de valor 0.5 correspondente à classe A, da ordem dos 23480 kWh/ano.

Foi dimensionado um sistema com uma potência de 16.2 kWp, com uma produção anual de 23693 kWh, correspondente a uma redução de consumo da rede eléctrica na ordem dos 28%. Para tal, seria necessária a instalação de 65 painéis, com a disposição indicada na Figura 37.

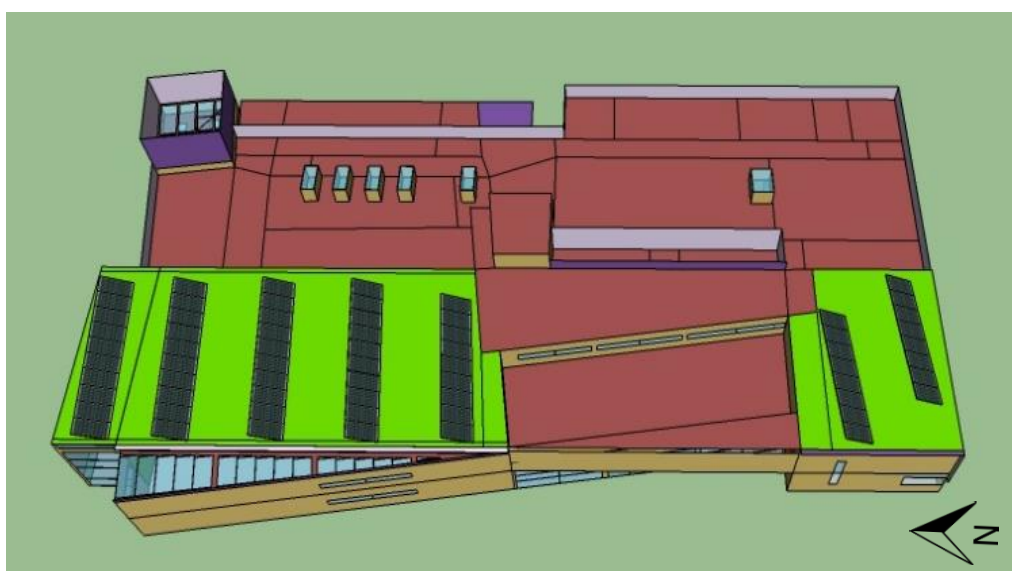


Figura 37 - Disposição dos módulos fotovoltaicos

9. Análise aos benefícios da implementação de medidas de redução de consumo e produção de energia no caso de estudo

A fase final desta dissertação passou pela avaliação da implementação das medidas de redução de consumo e produção de energia no edifício em estudo, em condições reais de funcionamento, aquilo que foi identificado como modelo real. A avaliação incidiu no consumo de energia global e na temperatura do ar e superficial de alguns elementos tendo em vista a avaliação do desempenho energético dos sistemas implementados. Esta avaliação inclui também uma análise simplificada da viabilidade económica dessas medidas.

9.1. Sistema de coberturas verdes

9.1.1. Análise de desempenho no modelo real

À semelhança do que foi feito no capítulo 8.4.1, mas para condições reais de funcionamento, foi adicionada a camada construtiva referente à cobertura verde a todos os objetos construtivos correspondentes a coberturas e que estivessem aptos para tal, sendo posteriormente analisada a resposta em termos de desempenho térmico e energético do edifício. Destaca-se o facto do edifício em estudo não apresentar qualquer horário ou condição específica de funcionamento para o sistema de climatização durante a estação de arrefecimento. Como tal, no presente subcapítulo apenas será estudada a redução do consumo de energia devida à utilização deste tipo de coberturas durante a estação de aquecimento. A Figura 38 evidencia os resultados obtidos mediante a introdução das coberturas verdes no modelo real.

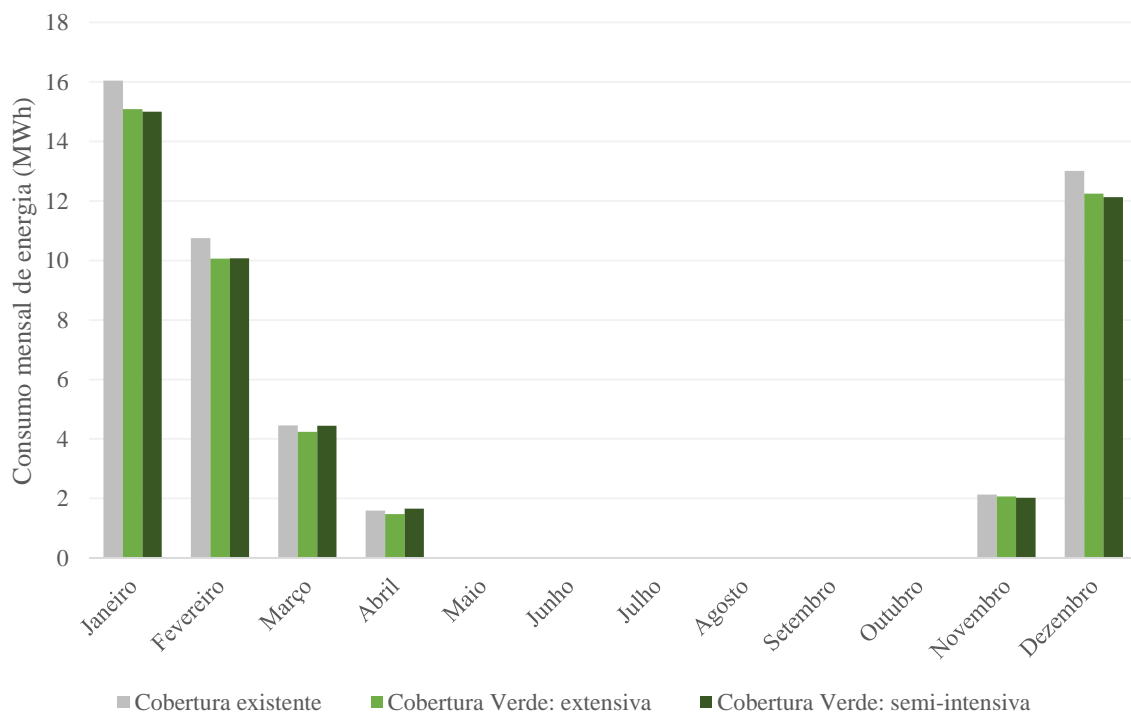


Figura 38 – Comparação entre o consumo mensal de energia eléctrica no modelo real, com e sem a aplicação de coberturas ajardinadas

Em todos os meses em que o sistema de climatização está ativo (Novembro a Abril), o consumo de energia reduziu ou manteve-se constante (apenas no mês de Abril). A redução do consumo de energia anual é pouco significativa, 5.9% para a cobertura verde extensiva e 5.5% para a cobertura verde semi-intensiva (Figura 39).

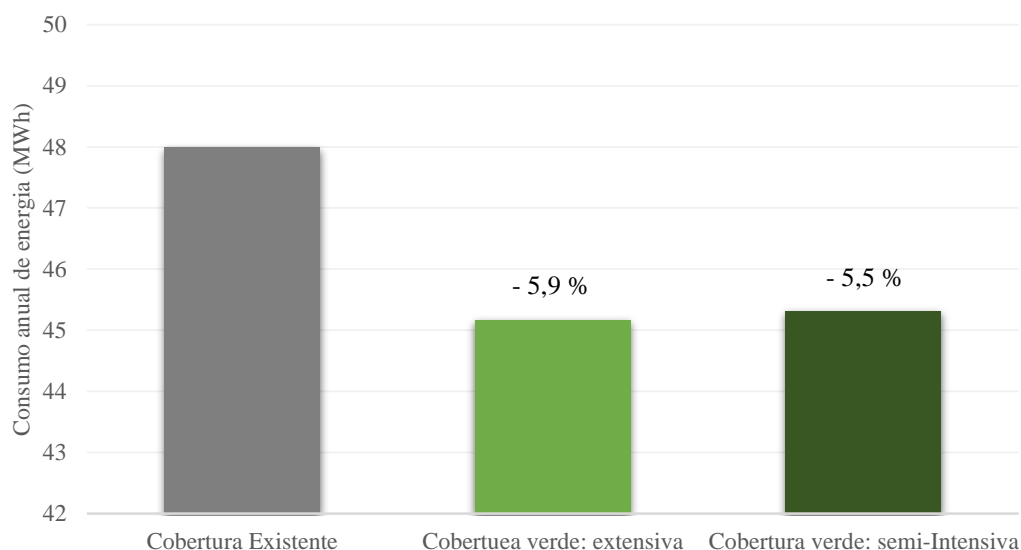


Figura 39 - Comparação entre o consumo anual de gás natural no modelo real, com e sem a aplicação de coberturas ajardinadas

Uma justificação possível para a redução pouco significativa é o facto do sistema construtivo existente apresentar características de elevado desempenho térmico comparativamente à maior parte dos edifícios existentes em Portugal no que diz respeito à existência de isolamento térmico e da cor clara da cobertura, tal como foi mencionado no capítulo 8.4.1. Na secção seguinte será realizado um estudo mais detalhado da influência destas duas características no presente caso de estudo. É também importante avaliar qual seria a resposta térmica do edifício na estação de arrefecimento para que se possa comprovar efetivamente a vantagem destas coberturas, aspecto que também vai ser discutido seguidamente.

9.1.2. Avaliação do desempenho de diferentes soluções de cobertura

Tendo em conta os resultados anteriores procedeu-se a uma análise mais detalhada das características que constituem as coberturas em estudo ao longo deste trabalho. Para os casos em que as coberturas possuem uma cor escura, existe uma elevada absorção de calor nos dias de verão aquecendo o edifício e o ar circundante. Por outro lado, entendem-se por coberturas claras (*white roof* ou *cool roof* em inglês) as coberturas constituídas por materiais que promovem a redução da necessidade de energia e a diminuição da temperatura tanto no interior como no exterior do edifício quando comparadas com coberturas tradicionais (Garrison et al. 2012). Isto acontece uma vez que estas são constituídas por materiais que promovem um grau de reflectância elevado, reduzindo o fluxo de calor para o interior do edifício. É precisamente este o tipo cobertura existente na maior parte do edifício em questão.

Para dar início à avaliação de desempenho das várias coberturas selecionou-se uma das coberturas claras existentes, e procedeu-se à verificação das suas condições de temperatura, bem como no

interior da zona térmica que esta delimita, a secção infantil (nº 14 na Figura 20). Na Tabela 12 apresentam-se as camadas construtivas da cobertura em questão.

Tabela 12 – Camadas construtivas referentes à cobertura clara em estudo

Material	Espessura (m)
Capeamento de Zinco nº12	0.065
Isolamento térmico <i>roofmate</i>	0.03
Emulsão betuminosa	0.0015
Betão B25	0.30
Reboco	0.01

A tabela que se segue apresenta as características da última camada construtiva da cobertura, sendo que é esta a que mais influência tem nas trocas diretas com o exterior.

Tabela 13 – Características construtivas da camada exterior referente à cobertura clara em questão

Material	Referência
Capeamento de Zinco nº12	CMRM
Rugosidade	Média
Espessura (m)	CMRM
Condutividade (W/m.K)	110
Densidade (kg/m3)	(Moita 2010)
Calor específico (J/kg.K)	7140
Absortância térmica	(Moita 2010)
Absortância solar	0.9
Absortância visível	(Cristina et al. 2014)
	0.4
	(Cristina et al. 2014)

Procedeu-se então à determinação dos *outputs* necessários para a análise. Primeiramente foram determinados os valores de temperatura ambiente (T_{amb}), temperatura superficial exterior e interior da cobertura clara (T_{se} : clara, T_{si} : clara) e da temperatura interior na zona em questão (T_{int} : clara). Seguidamente, para cada tipo de cobertura jardim (extensiva e semi-intensiva) foram extraídos os seguintes parâmetros:

- Temperatura da folhagem (T_f : extensiva, T_f : semi-intensiva);
- Temperatura do solo (T_{sl} : extensiva, T_{sl} : semi-intensiva);
- Temperatura superficial interior (T_{si} : extensiva, T_{si} : semi-intensiva);
- Temperatura interior (T_{int} : extensiva, T_{int} : semi-intensiva).

Para avaliar os resultados de forma abrangente, as simulações foram efetuadas nos dias mais quente, mais frio, e no qual se verificou maior radiação (definidos em 7.4.1.1), visto que são estes os parâmetros físicos que mais influência têm nas trocas existentes nestas coberturas. Todos os resultados apresentados em seguida foram obtidos para condições de regime livre.

Dia mais frio do ano

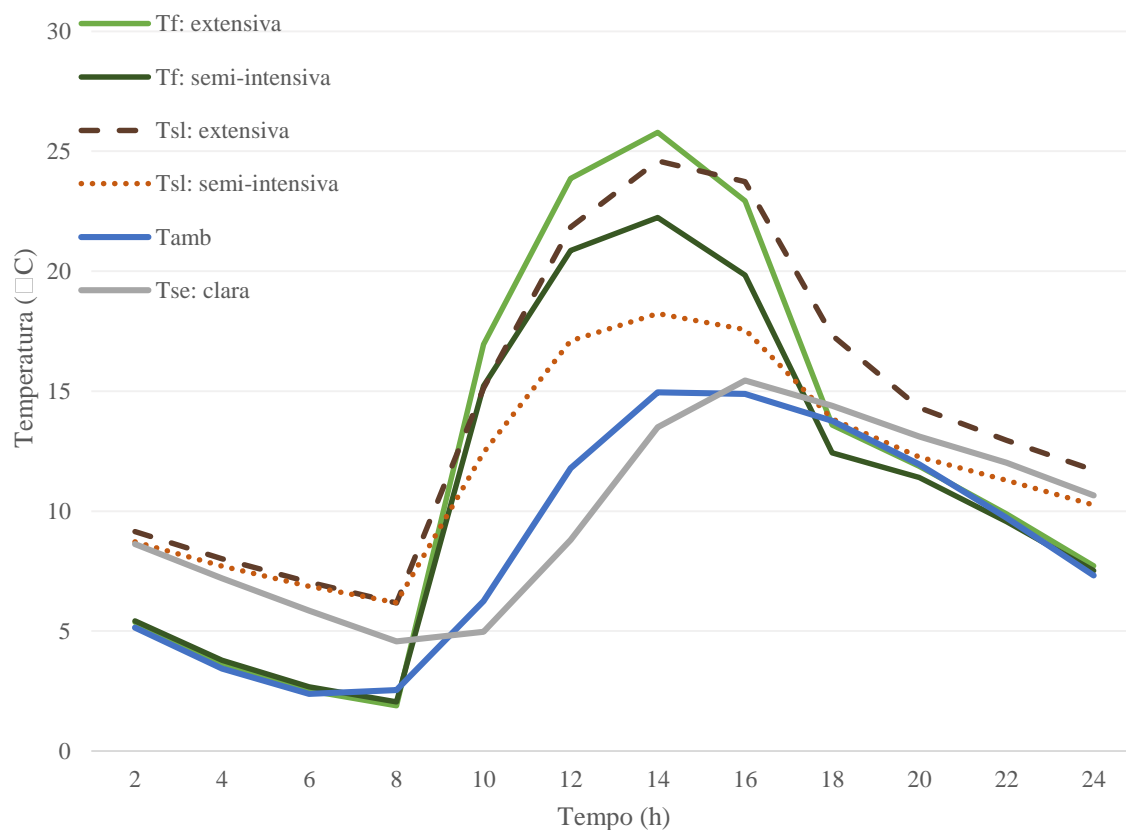


Figura 40 – Dia mais frio: Temperatura da folhagem e do solo das coberturas extensiva e semi-intensiva, temperatura ambiente e temperatura superficial exterior da cobertura clara

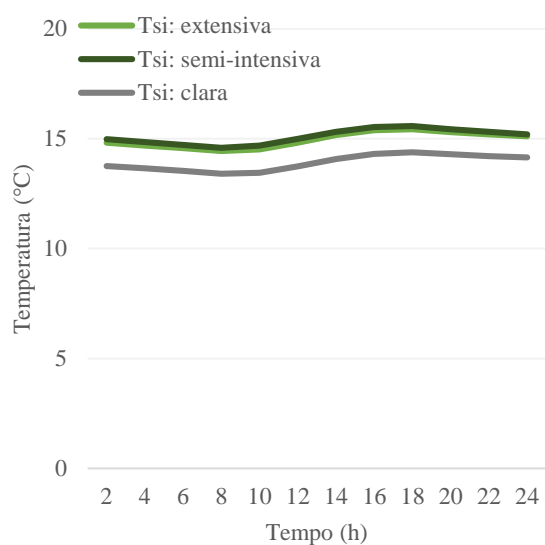


Figura 42 – Dia mais frio: Temperatura superficial exterior das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara

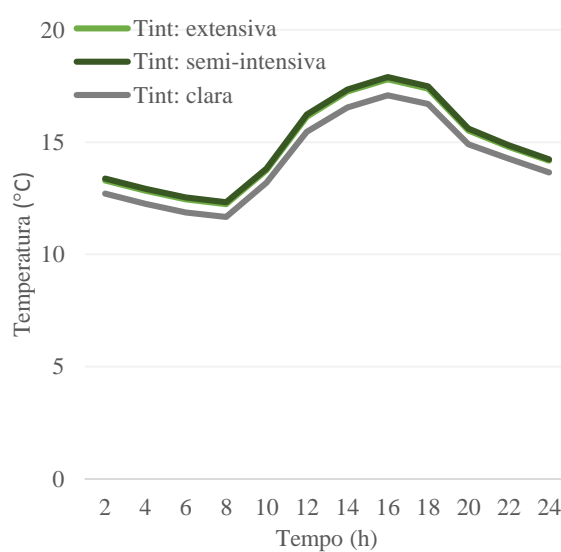


Figura 41 – Dia mais frio: Temperatura interior da zona mediana da aplicação das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara

Dia mais quente do ano

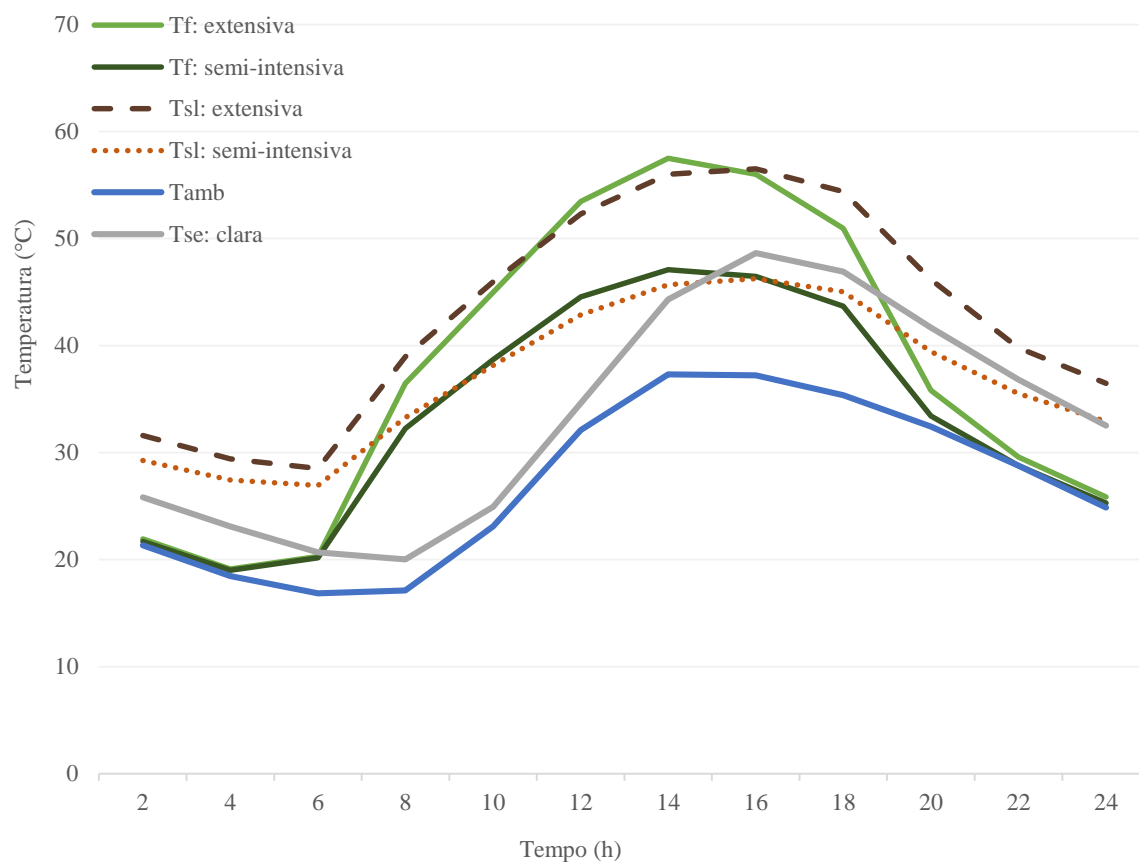


Figura 43 – Dia mais quente: Temperatura da folhagem e do solo das coberturas extensiva e semi-intensiva, temperatura ambiente e temperatura superficial exterior da cobertura clara

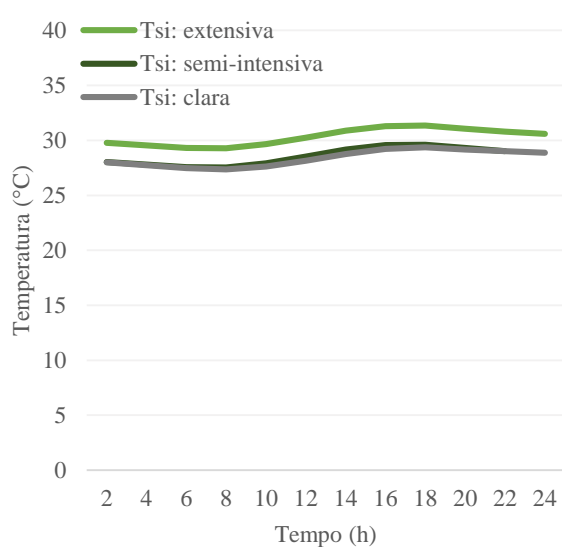


Figura 45 – Dia mais quente: Temperatura superficial exterior das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara

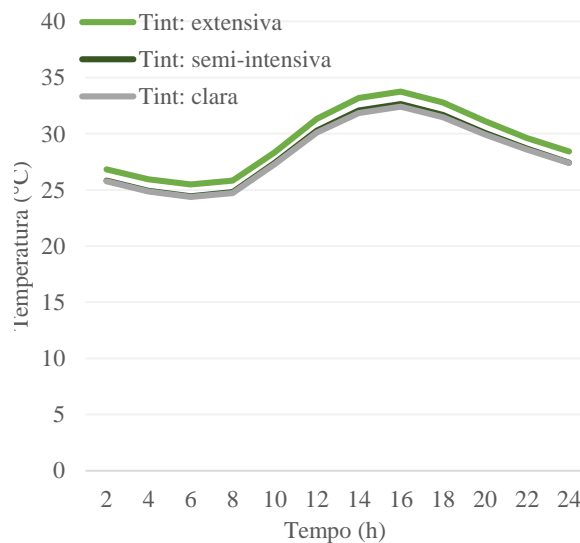


Figura 44 – Dia mais quente: Temperatura interior da zona mediana mediante a aplicação das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara

Dia de maior radiação

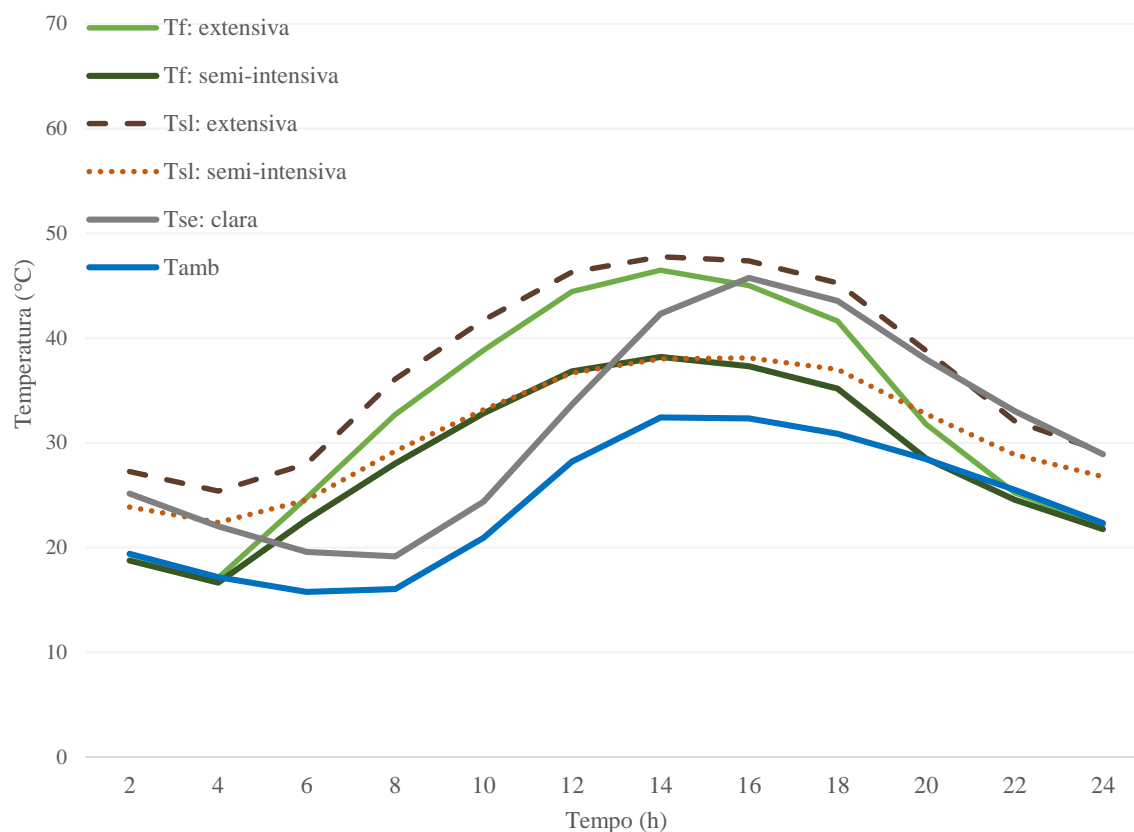


Figura 46 – Dia de maior intensidade radiativa: Temperatura da folhagem e do solo das coberturas extensiva e semi-intensiva, temperatura ambiente e temperatura superficial exterior da cobertura clara

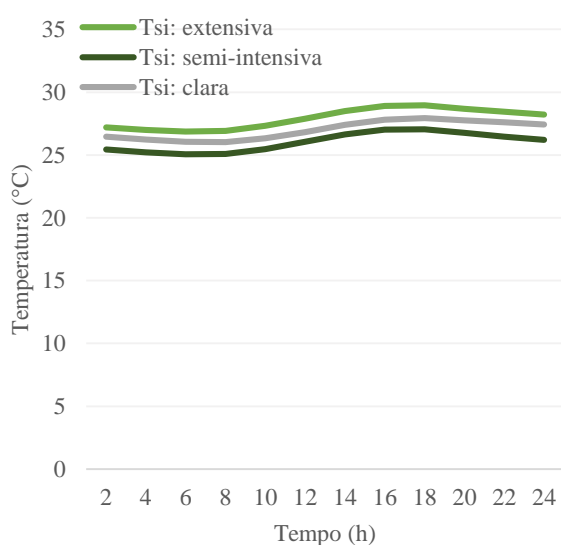


Figura 48 – Dia de maior intensidade radiativa: Temperatura superficial exterior das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara

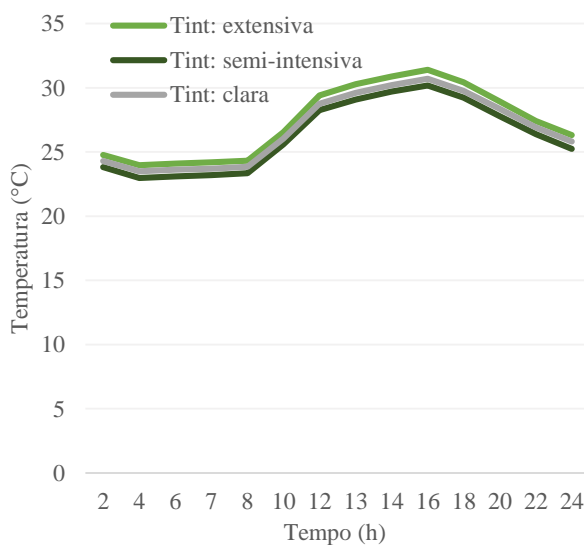


Figura 47 – Dia de maior intensidade radiativa: Temperatura interior da zona mediante a aplicação das coberturas extensiva, semi-intensiva e clara

Dia mais frio

Durante o período de funcionamento do edifício (9h-18h) a cobertura extensiva é a que se apresenta menos protegida pela vegetação, e como tal é capaz proporcionar equilíbrio no sombreamento o que faz com que não haja uma grande diferença de temperatura entre a folhagem (Tf) e o solo (Tsl). Na cobertura semi-intensiva essa diferença é mais acentuada, uma vez que esta contém uma quantidade considerável de vegetação que leva a níveis de sombreamento e evapotranspiração elevados, traduzidos numa temperatura inferior tanto ao nível da folhagem como do solo. A cobertura clara (existente atualmente) é a que apresenta pior comportamento no dia em questão, uma vez que devido à sua elevada reflectância é a que apresenta uma temperatura superficial exterior média da membrana, mais reduzida, 11.8 °C. Para o mesmo período, a temperatura média nas folhagens é superior em 8.7 °C no caso da cobertura extensiva, e em 6.2 °C no caso da cobertura semi-intensiva (Tabela 14).

Tabela 14 - Dia mais frio: Temperaturas médias nas camadas construtivas durante o período de funcionamento do edifício

Tse_média: clara	11.8 °C
Tf_média: extensiva	20.5 °C
Tf_média: semi-intensiva	18.0 °C
Tsolo_média: extensiva	20.6 °C
Tsolo_média: semi-intensiva	15.9° C

Dia mais quente

No dia mais quente, a cobertura mais desfavorável é a cobertura extensiva, consequência da baixa densidade de vegetação que resulta num baixo nível de sombreamento da cobertura e do solo. A cobertura clara é a que apresenta melhor desempenho (Tse: clara é a que apresenta valores mais baixos) na maior parte do dia devido mais uma vez ao seu alto poder refletivo, no entanto, depois das 15h a cobertura semi-intensiva ganha destaque, apresentando temperaturas inferiores. Isto acontece devido ao elevado nível de evapotranspiração que ocorre nas horas de temperaturas mais elevadas, coincidindo também com o período de rega. Contrariamente ao que acontece no dia mais frio, nesta situação, é a cobertura clara que apresenta melhor desempenho durante o período de funcionamento do edifício, apresentando uma temperatura superficial exterior média inferior em 11.6 °C quando comparado com a temperatura média da folhagem da cobertura extensiva e em 3.2 °C comparativamente com a semi-intensiva (Tabela 15).

Tabela 15 - Dia mais quente: Temperaturas médias nas camadas construtivas durante o período de funcionamento do edifício

Tse_média: clara	41 °C
Tf_média: extensiva	52.6 °C
Tf_média: semi-intensiva	44.2 °C
Tsolo_média: extensiva	53.3 °C
Tsolo_média: semi-intensiva	44 °C

Dia de maior radiação

A temperatura média exterior é de 24 °C, cerca de 3 °C inferior à do dia mais quente. Devido a isso o comportamento das coberturas ao longo deste dia é semelhante ao comportamento apresentado para o dia mais quente, com as coberturas branca e semi-intensiva a exibirem melhor desempenho

(Tint mais baixa). No entanto a cobertura semi-intensiva destaca-se ligeiramente sendo que apresenta um valor de Tinterior em média de 0.5 °C inferior. Isto acontece devido à elevada radiação que se faz sentir nesse dia que facilita os processos de evapotranspiração, fazendo com que o ar existente entre a folhagem e o solo apresente uma temperatura inferior, o que faz com que consequentemente, a Tinterior seja também inferior.

Todas as coberturas verdes apresentam um albedo de cerca de 0.25 (vegetação). Pode constatar-se que esse valor é bastante similar ao de coberturas mais escuras, tendencialmente com pior comportamento para dias mais quentes (elevadas absorvâncias e baixas reflectâncias), no entanto isso não significa que apresentem necessariamente um comportamento térmico semelhante. O que acontece é que apesar da radiação ser absorvida pela vegetação, esta é impedida de ser diretamente absorvida pelo solo devido ao sombreamento provocado pela camada de vegetação. Também o ar existente entre o solo e a vegetação contribui para que isto aconteça, uma vez que nessa camada parte do calor é absorvido através da evaporação da água existente no solo e da transpiração das plantas. O resultado final é a diminuição da temperatura do ar nas proximidades do solo, fazendo com que consequentemente a temperatura deste também diminua.

Podemos constatar que os processos de evapotranspiração e sombreamento associados às coberturas verdes são favoráveis na estação quente para as horas de maior calor. No entanto, a principal melhoria associada a este sistema faz-se notar na estação fria, com a utilização da cobertura extensiva. Isto acontece não devido à ocorrência desses processos, uma vez que os valores de temperatura e radiação são baixos, mas devido à fraca refletividade (e maior poder absorvivo) que faz com que o valor de temperatura desta cobertura seja superior quando comparada com a cobertura clara existente, e pelo facto de não provocar tanto sombreamento (baixo LAI) quanto o provocado pela cobertura semi-intensiva.

As temperaturas superficiais interiores estão diretamente ligadas às temperaturas superficiais exteriores mas existe um outro fator determinante para que os efeitos produzidos por sistemas como as coberturas em estudo se façam ou não sentir: o isolamento existente na laje da cobertura. Não foi feito um estudo da influência direta do valor de espessura de isolamento na variação das temperaturas superficiais interiores ou dos consumos de energia no decorrer desta dissertação, no entanto, foi consultada bibliografia para o efeito e com recurso Tabela 16 foi possível determinar algumas conclusões.

Tabela 16 – Variação do consumo de energia entre diferentes soluções de cobertura e espessuras de isolamento (Cristina et al. 2014)

Consumo Anual de Energia (kWh/ano/m ²)									
XPS (cm)	Cobertura Verde de referência			Cobertura Verde Extensiva			Cobertura Verde Semi- Intensiva		
	Aquec.	Arrefe.	Total	Aquec.	Arrefe.	Total	Aquec.	Arrefe.	Total
0	10.9	31.3	42.2	17.5	55.2	72.7	19.4	19.7	39.1
2	5.8	26.3	32.1	8.7	42.9	51.6	11.9	17.7	29.6
4	1.8	23.4	27.0	5.6	34.7	40.3	8.4	16.2	24.6

Os valores apresentados dizem respeito a um estudo realizado num edifício da Fundação Calouste Gulbenkian, que verificava compreender a variabilidade do consumo de energia por parte do edifício com o tipo de cobertura verde adotada e com o aumento da espessura do isolamento. Pode constatar-

te que para o mesmo tipo de cobertura, o aumento do isolamento altera o consumo de forma bastante significativa. Outro aspeto a reter é que à medida que a espessura de isolamento aumenta a variabilidade no consumo de energia entre os três tipos de coberturas, perde expressividade. Ou seja, o que se pretende provar é que o desempenho energético e térmico do edifício com as diferentes coberturas varia fundamentalmente com a existência ou não de isolamento térmico. A cobertura da zona em estudo apresenta na sua constituição uma camada de 3 cm de isolamento o que faz com que a variação da temperatura interior não seja muito notória. No dia mais frio, o valor de temperatura superficial interior das camadas extensiva e semi-intensiva mantém-se praticamente inalterado, e, em média, apenas 1.1 °C superior ao valor de temperatura superficial verificado para a cobertura clara. No dia mais quente, por sua vez, são as coberturas semi-intensiva e branca que apresentam valores de temperatura superficial interior coincidentes e inferiores à temperatura associada à cobertura extensiva em 1.2 °C, em média. As temperaturas interiores apresentam valores médios semelhantes dos das temperaturas superficiais interiores, no entanto, sofrem mais oscilações ao longo do dia provocadas pelos ganhos internos existentes no interior do edifício.

Os resultados obtidos vão de encontro aos obtidos por (Cristina et al. 2014), sendo que foi este o estudo tido como base de validação dos resultados obtidos. É preciso ter em atenção que os estudos foram efetuados para zonas climáticas distintas, sendo que no presente trabalho as temperaturas exteriores apresentam valores ligeiramente mais elevados.

No subcapítulo 9.1.1 ficou em aberto qual seria a reação do edifício perante a implementação de coberturas verdes para a estação de arrefecimento. Ficou determinado que na estação de aquecimento seria benéfico em cerca de 6% tanto no caso das coberturas extensivas como no caso das coberturas semi-intensivas. Tendo por base os resultados obtidos para o dia mais quente, a análise anterior vem provar que para a estação de arrefecimento, a implementação de cobertura verde semi-intensiva não seria prejudicial ao comportamento térmico do edifício. É certo, que as temperaturas interiores não sofrem alterações muito significativas quando comparadas com as que existem com as coberturas claras, no entanto, somando a redução de 6% de consumo no Inverno, com outros benefícios ambientais associados a estas coberturas, estas podem ser uma mais-valia.

Tal como é defendido em (Garrison et al. 2012), as coberturas claras são extremamente positivas, no entanto, não contribuem para o escoamento das águas pluviais uma vez que não deixam de ser superfícies impermeáveis. Também não têm a capacidade de contribuir para a captação de CO₂ através do processo de fotossíntese e para o aumento da biodiversidade. Outro fator negativo, comprovado pelos resultados obtidos, é o facto de a sua reflexão poder ser prejudicial no Inverno minimizando a entrada de ganhos de calor no edifício, permitindo, por outro lado, a saída destes do interior para o exterior do edifício, uma vez que não apresenta a mesma capacidade isolante das coberturas jardim.

9.1.3. Análise económica

O custo associado às coberturas verdes difere do custo associado a uma cobertura tradicional, no entanto, existem um conjunto de fatores a ter em conta aquando da realização de um estudo económico para estes sistemas. Níveis de consumo de energia no edifício, aumento da durabilidade dos materiais, custos de manutenção, têm sempre que ser equacionados e variam de caso para caso.

Dependendo da localização, os custos de instalação variam entre si, no entanto, vários estudos tendem a concordar que o custo construtivo inicial das coberturas verdes é superior ao das coberturas convencionais, embora este dado não se verifique a longo prazo. Para a instalação de coberturas ajardinadas, estimativas demonstram que normalmente o custo varia entre os 100 e os 250 €/m². A cidade de Portland, Oregon, apresenta valores diferentes e estima que o custo de instalação destes sistemas possa variar entre os 50 e os 200 €/m². Num segundo estudo, Portland assumiu que para uma cobertura extensiva os custos de construção seriam cerca de 55€/m² superiores aos custos associados

a coberturas tradicionais. Por outro lado, uma análise feita na cidade de Nova Iorque assumiu um custo médio de implementação de coberturas verdes cerca de duas vezes superior ao de uma cobertura tradicional (180 €/m² para coberturas verdes e 90 €/m² para coberturas tradicionais). Contudo, nem as coberturas verdes extensivas (com plantas típicas e adaptadas ao clima), nem as coberturas tradicionais requerem manutenção significativa, sendo que, em média, coberturas ajardinadas podem requerer ligeiramente mais manutenção que as tradicionais, nomeadamente na remoção de ervas daninhas, irrigação e tratamento das plantas. No entanto, quando comparados os custos de manutenção de ambas as soluções, as diferenças entre custos são baixas ou inexistentes: 2 - 15 €/m²/ano para coberturas verdes, e 1 - 2,5€/m²/ano para coberturas tradicionais. É importante voltar a frisar que as coberturas ajardinadas podem ainda aumentar a durabilidade das coberturas existentes, protegendo-as da degradação associada ao tráfego, e à poluição e detritos ambientais (Garrison et al. 2012).

As coberturas claras, como opção menos intensiva, apresentam um custo bastante competitivo em relação as coberturas tradicionais, com preços a par destas ou apenas ligeiramente superiores, 2 €/m² (dependendo do tipo de cobertura), sendo que tal como as coberturas jardim, também estas podem estender a durabilidade das coberturas ao contribuir para a diminuição das flutuações de temperatura nas superfícies.

Para avaliar a mais-valia da aplicabilidade de sistemas de poupança de energia, o tempo de retorno do investimento é um dos aspetos que mais se tem em conta. No caso das coberturas verdes esse cálculo é difícil de fazer, podendo acarretar muitos erros e incertezas uma vez que os custos associados variam consideravelmente consoante o sistema que se pretende adotar (mais ou menos complexo), altura do edifício, espessura do isolamento, local de implementação entre muitos outros fatores.

Para a presente análise económica foram feitos apenas cálculos simples, tendo em conta apenas os principais parâmetros associados a este tipo de estudo, apresentados na Tabela 17. Foi considerada a implementação de uma cobertura semi-intensiva pouco complexa e que não exija muita manutenção, representativa do sistema ideal para o edifício em questão. Foi também considerado um cenário conservador para a inflação anual no preço do gás natural na ordem dos 1% (EIA 2016), e a percentagem de poupança anual de energia, 6%, obtida no estudo referente à análise do desempenho energético de coberturas ajardinadas para o modelo em questão, realizada no capítulo 9.1.1.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados determinação da viabilidade económica da implementação de coberturas verdes

Área de implementação (m ²)	Custo por m ² (€/m ²)	Custo total (€)	Custo de manutenção (€/m ² /ano)	Inflação energética anual	Percentagem de poupança anual	Payback (anos)
1 145	150	171 750	1	1%	6.00%	42

Considerando os parâmetros mencionados acima, a recuperação do investimento estaria completa no período de 42 anos. Contudo, como já foi mencionado acima, uma simples análise aos custos iniciais deste tipo de coberturas não permite determinar a equação global do balanço de ganhos e custos, uma vez que não tem em conta muitos outros benefícios associados. Como exemplo, temos o aumento da durabilidade dos materiais presentes na cobertura (que segundo (Peck et al. 1999) pode duplicar) bem como a redução nos custos associados à drenagem de águas pluviais (diminuição do número de pontos de drenagem) que resultam na diminuição do custo global da cobertura.

Fornecedores e incentivos fiscais são outros dos fatores que fazem variar o custo global destes sistemas. Há países que apresentam incentivos económicos que promovem a instalação de coberturas verdes como é o exemplo da Alemanha, onde 43 % das cidades oferecem incentivos fiscais para a instalação de coberturas ajardinadas, bem como em Portland onde os códigos de construção dizem

que para 0,09 m² de coberturas ajardinadas instaladas, o promotor terá direito a um extra de 0,27 m² de espaço no solo (Pinto 2014).

As coberturas ajardinadas apresentam portanto uma serie de características e fatores que promovem o seu valor a longo prazo, características essas que não estão presentes em coberturas tradicionais e cujo valor monetário é dificilmente calculável.

9.2. Sistema Fotovoltaico

9.2.1. Análise de desempenho em modelo real

Para a realização desta análise, a área de implementação do sistema fotovoltaico foi a mesma que se usou no subcapítulo 8.4.2. O primeiro passo passou pela determinação de um diagrama de carga correspondente a quatro dias típicos, correspondentes a cada uma das quatro estações do ano. Esse diagrama foi seguidamente ajustado, de forma a contemplar consumos correspondentes a todos os dias do ano (úteis e não úteis), na tentativa de convergir o mais possível com o consumo real faturado de eletricidade. O resultado é o apresentado na Figura 49.

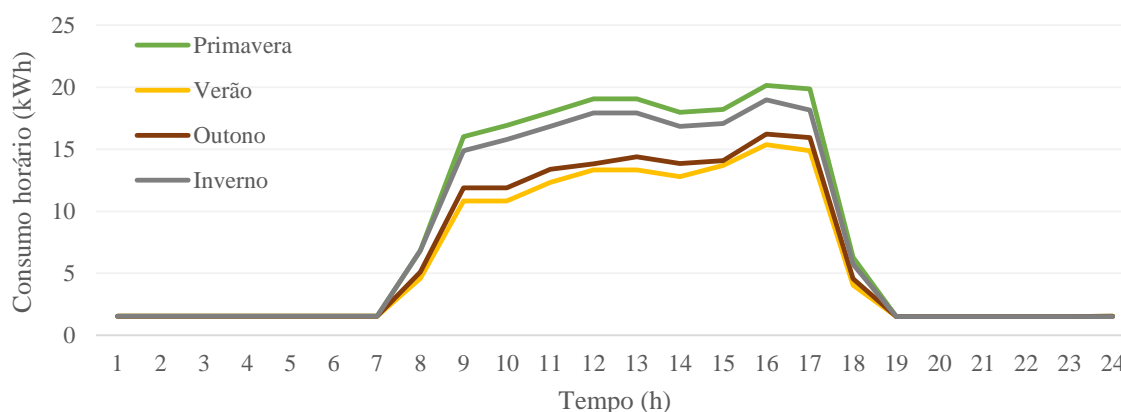


Figura 49 – Diagrama de carga eléctrica dos quatro dias típicos correspondentes a cada uma das estações do ano

Os meses de maior consumo de eletricidade correspondem aos meses de Primavera e Inverno. A maior incidência de consumo eléctrico nestes meses pode ser justificada por serem períodos que exigem maior necessidade de iluminação interior (Inverno), bem como por serem os meses de maior afluência devido aos compromissos letivos de grande parte dos seus utilizadores.

Seguidamente foi calculado o potencial de produção anual de eletricidade. Começou por se aplicar o método de cálculo exemplificado nas equações 8 e 9, com o valor de radiação (I) correspondente a cada estação. Para cada uma delas, multiplicou-se o valor obtido pelo número de dias correspondentes, e através da soma dos quatro valores adquiridos determinou-se a produção anual por painel. Para a determinação da energia anualmente produzida, o último passou pela multiplicação desse valor pelo número de painéis a instalar. Para tal, efetuaram-se três estudos onde se pretendia avaliar qual o sistema mais adequado para a situação em questão, diferenciando para isso a capacidade a instalar entre 11, 13.75 e 17.5 kWp.

A Figura 51 ilustra os resultados da análise de produção e consumo obtidos para os 4 dias. Através da observação da mesma torna-se perceptível em que épocas do ano o excedente é maior ou menor, bem como as alturas em que a produção é 100% dedicada a autoconsumo do edifício. Os gráficos

apresentados dizem respeito ao sistema de maior capacidade (17.5 kWp), no entanto, a mesma análise foi realizada para os restantes sistemas e os resultados obtidos podem ser consultados no Anexo D. A área disponível para implementação deste sistema foi apresentada na Figura 36 do capítulo 8.4.1, Quanto à instalação, os módulos encontram-se divididos em três strings: duas com 24 módulos fotovoltaicos e a restante com 22. A disposição dos painéis seria a apresentada na Figura 50.

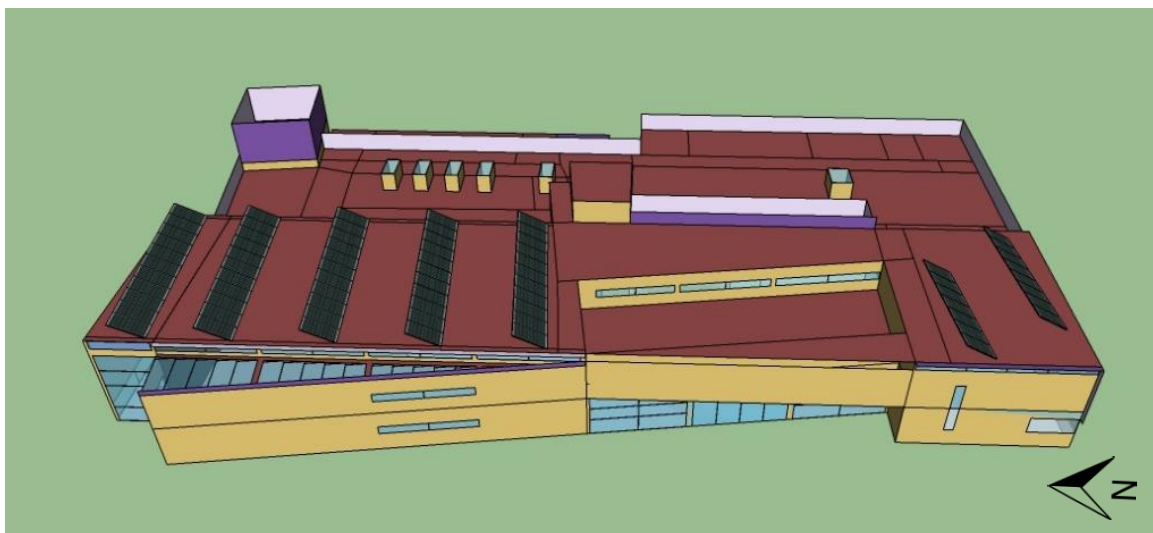
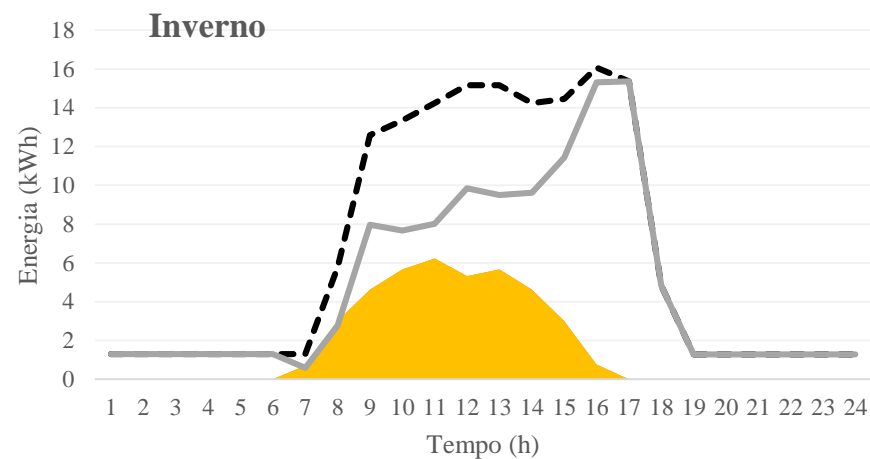
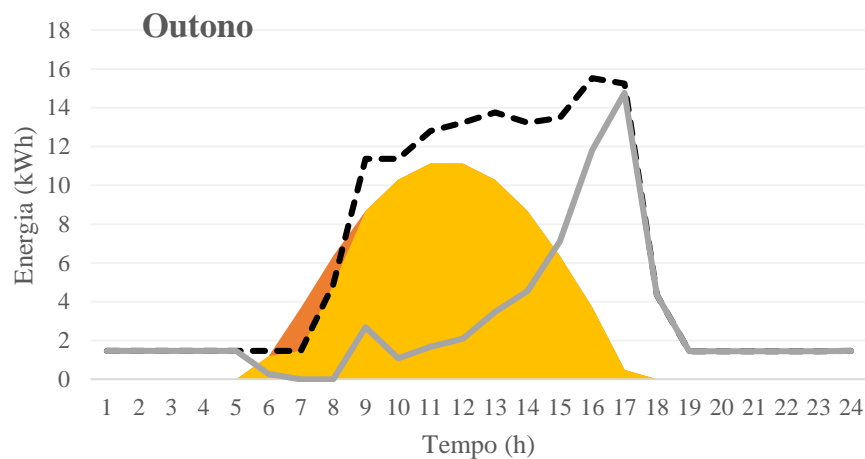
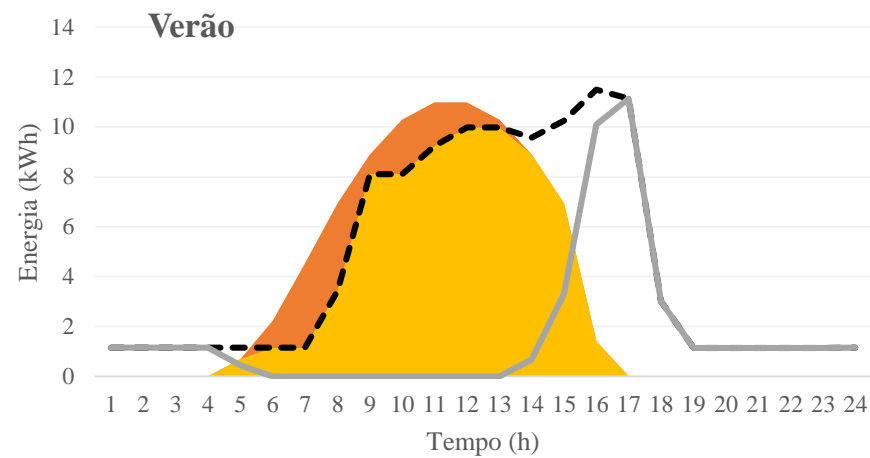
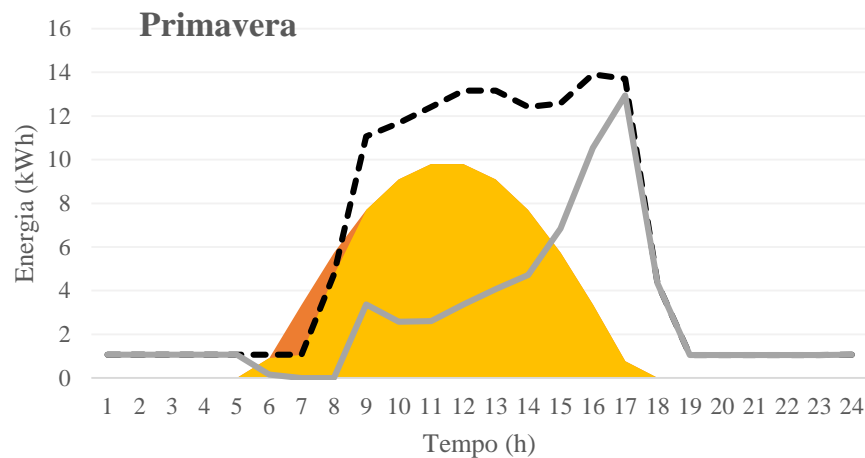


Figura 50 - Distribuição dos painéis fotovoltaicos para o sistema de 17.5 kWp



Excedente
 Autoconsumo
 Consumo típico
 Necessidade final de energia

Figura 51 – Consumo típico, necessidade final de energia, excedente e autoconsumo de energia após a instalação de um sistema de 17.5 kWp em cada uma das quatro estações.

Optou-se por se apresentar com maior destaque a análise feita ao sistema de 17.5 kWp uma vez que devido as características energéticas (e económicas apresentadas no subcapítulo seguinte) se considerou o mais adequado para a situação. Para cada uma das horas foi determinado: o excedente, que indica a fração de energia produzida e não utilizada pelo edifício; o autoconsumo, quantidade de energia produzida e consumida no edifício; o consumo típico que dá a informação da quantidade de energia que é tipicamente consumida pelo edifício; e o consumo com fotovoltaico que demonstra a necessidade final de energia do edifício contabilizando já a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, ou seja, qual a quantidade de energia que ainda terá de ser fornecida pela rede.

Na Tabela 18 são apresentados em síntese, os principais dados respeitantes a cada tipo de sistema:

Tabela 18 – Comparação dos principais valores entre casos de estudo

Potência instalada (kWp)	17.50	13.75	11.50
Nº de painéis	46	55	70
Area de Módulo (m²)	114.8	90.2	75.4
Área disponível (m²)	370		
Percentagem da área disponível utilizada (%)	30	24	20
Consumo anual típico (kWh/ano)	50361		
Produção fotovoltaica (kWh/ano)	25399	20046	16833
Autoconsumo (kWh/ano)	23462	19293	16337
Autoconsumo percentual (%)	92.4	96.3	97.1
Excedente (kWh/ano)	1937	753	497
Excedente percentual (%)	7.6	3.8	3.0
Necessidade final de energia (kWh)	26899	31068	34024
Percentagem de diminuição de consumo (%)	-46.6	-38.3	-32.4
Fração do consumo assegurado pela produção fotovoltaica (%)	50.4	39.8	33.4

O sistema de maior capacidade corresponde ao sistema com maior quantidade de energia produzida anualmente. Consequentemente será também o sistema com maior porção de energia produzida e consumida no edifício bem como o que apresenta maior excedente. No entanto, todos os sistemas apresentam valores de excedente relativamente baixos, de 3.0 a 7.6%, quando comparados com a quantidade de energia efetivamente utilizada pelo edifício, de 92.4 a 97.1%. Quanto à necessidade final de energia, é consideravelmente inferior para o sistema de maior potência. A percentagem de diminuição de consumo é de cerca de 47%, o que significa através da instalação deste sistema, a necessidade de energia proveniente da rede seria reduzida a quase metade do seu valor atual. Apesar do sistema de 17.5 kWp ser energeticamente mais proveitoso, qualquer um dos sistemas mencionados é benéfico para o funcionamento do edifício, tornando-o mais eficiente energeticamente e contribuindo para a redução da sua fatura energética.

9.2.2. Análise económica – Sistema de produção fotovoltaica

Tal como para as coberturas verdes foi também feita uma análise simplificada da viabilidade económica da implementação de sistemas de produção de energia solar. Primeiramente, há que referir que para o estudo em questão não foi estudada ou considerada a hipótese de venda da energia excedente à rede pública, sendo que o sistema foi dimensionado para que se consumisse no edifício o máximo da energia produzida por este. Caso essa hipótese fosse considerada, seria necessário adquirir um conjunto de equipamentos e resolver questões logísticas tais como, contadores, registo,

taxas entre outros. Outro aspeto desprezado nesta análise é o facto de que a capacidade de produção de um painel poder diminuir com os anos.

Esta análise foi feita com o apoio de um operador de mercado, a empresa BoaEnergia, que facultou todos os dados necessários.

Na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21, estão presentes os custos totais associados a cada um dos componentes, as quantidades necessárias bem como a percentagem equivalente a cada um deles no custo total. Está também presente o custo total de cada sistema, o custo por Watt-pico bem como o respetivo tempo de retorno do investimento (*Payback*).

O tempo de retorno de investimento foi calculado com recurso à equação 10:

$$Payback = \frac{\text{Valor total do investimento}}{\text{Ganho anual}} \quad [10]$$

O valor de ganho anual caracteriza-se pela conversão do valor energético efetivamente poupado devido à implementação do sistema, numa quantia monetária, através da multiplicação do seu valor pela tarifa energética em vigor. Tal como para o sistema de coberturas verdes, foi considerada uma taxa de inflação do preço de energia. No caso da eletricidade, adotou-se o valor de 2.5%/ano, considerando a tarifa de 0.165 €/kWh no ano referente à instalação. Foram também considerados possíveis custos de manutenção anual do sistema, na ordem dos 0.5% do investimento inicial. Além do tempo de retorno do investimento, foi também calculada a poupança obtida em 10 anos mediante a instalação destes sistemas.

Tabela 19 – Componentes, quantidades e custos associados aos componentes que compõem o sistema de 17.5 kWp

17.5 kWp			
Componentes	Quantidade	Custo total por tipo de componente	Percentagem do investimento
Módulos fotovoltaicos	70	15 578 €	56%
Inversor	1	3 036 €	11%
Estrutura	1	3 542 €	13%
Monitorizador	1	922 €	3%
Contador	1	484 €	2%
Material diverso	17.5	187 €	1%
Material elétrico	17.5	1 123 €	4%
Instalação	17.5	2 246 €	8%
Certificação	1	246 €	1%
Transporte	1	223 €	1%
Total		27 587 €	
Investimento específico		1.28 €/Wp	
Payback		5.56 anos	
Poupança a 10 anos		41 800 €	

Tabela 20 - Componentes, quantidades e custos associados aos componentes que compõem o sistema de 13.75 kWp

13.75 kWp			
Componentes	Quantidade	Custo por componente	Percentagem do investimento
Módulos fotovoltaicos	55	12 240 €	56%
Inversor	1	3 583 €	11%
Estrutura	1	2 783 €	13%
Monitorizador	1	585 €	3%
Contador	1	484 €	2%
Material diverso	13.75	147 €	1%
Material elétrico	13.75	882 €	4%
Instalação	13.75	1 765 €	8%
Certificação	1	246 €	1%
Transporte	1	223 €	1%
<hr/>			
Total		22 938 €	
Investimento específico		1.36 €/Wp	
Payback		5.59 anos	
Poupança a 10 anos		34 400 €	

Tabela 21 - Componentes, quantidades e custos associados aos componentes que compõem o sistema de 11.5 kWp

11.5 kWp			
Componentes	Quantidade	Custo por componente	Percentagem do investimento
Módulos fotovoltaicos	46	10 237 €	52%
Inversor	1	3 140 €	16%
Estrutura	1	2 327 €	12%
Monitorizador	1	585 €	3%
Contador	1	484 €	2%
Material diverso	11.5	123 €	1%
Material elétrico	11.5	738 €	4%
Instalação	11.5	1 476 €	8%
Certificação	1	246 €	1%
Transporte	1	223 €	1%
<hr/>			
Total		19 579.40 €	
Investimento específico		1.38 €/Wp	
Payback		5.63 anos	
Poupança a 10 anos		29 100 €	

É possível constatar que tal como no subcapítulo anterior o sistema de maior capacidade, 17.5 kWp, mostrou ser o mais vantajoso. O investimento específico por kWp é prova disso mesmo, diminuindo com o aumento da potência dos sistemas. Também o tempo de retorno do investimento o comprova, visto que apesar da pequena diferença entre sistemas para o sistema de maior capacidade esse valor é menor. Sistemas de maior potência, apresentam consequentemente maior capacidade de produção e de redução da quantidade de energia solicitada à rede, diminuindo a fatura energética.

10. Conclusão e Desenvolvimentos Futuros

Os objetivos propostos para a elaboração deste trabalho foram cumpridos, isto é, a construção de um modelo em *EnergyPlus* validado e calibrado do edifício em estudo que permitisse efetuar uma análise energética para a caracterização dos consumos, necessidades e ganhos energéticos. A validação dos pressupostos de modelação teve por base o desvio dos consumos obtidos por simulação face aos consumos reais faturados que se mostrou inferior a 10%: +7% no caso da eletricidade e -9% no caso do gás natural. Pela análise da desagregação de consumos verificou-se que 41% da energia final é despendida no consumo de equipamentos, 31% em iluminação e 28% em climatização, nomeadamente em aquecimento. No âmbito da determinação da classe energética, o edifício obteve a classe B. Foi posteriormente avaliada a viabilidade da implementação de medidas de melhoria, nomeadamente a implementação de coberturas verdes com o objetivo de reduzir o consumo de energia, e a produção de energia com recurso a painéis solares fotovoltaicos, na tentativa de tornar o edifício mais autónomo do ponto de vista energético

Para que se pudesse estudar a variabilidade dos consumos com recurso às coberturas verdes recorreu-se ao *software EnergyPlus*. Este compreende uma estrutura modular que permite a incorporação de novas funcionalidades por parte dos utilizadores, nomeadamente o modelo de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008). Foram analisados dois tipos de coberturas: extensivas e semi-intensivas. Da aplicação destes sistemas a 85% da área de cobertura, apenas resultou uma diminuição do consumo de energia final de 1% no caso das semi-intensivas, sem qualquer influência na classificação energética. Para o estudo de viabilidade da integração de painéis solares fotovoltaicos no edifício recorreu-se ao PVGIS que disponibiliza dados referentes à radiação solar, e ao *SMA - Sunny Design Web* que contém uma extensa base de dados de todos os componentes necessários ao funcionamento destes sistemas. Com a implementação de painéis solares em 27% da área total de cobertura o consumo de eletricidade seria diminuído em 28%.

Estes dois sistemas foram posteriormente considerados na simulação do edifício, em condições reais de funcionamento. No caso da aplicação de coberturas verdes, o consumo de gás natural para aquecimento sofreu uma diminuição de 5.9% para as coberturas extensivas, e 5.5% para as coberturas semi-intensivas. Foi também feita uma comparação do desempenho energético anual entre a cobertura existente (cobertura clara) e as duas tipologias de cobertura verde em estudo, tendo-se concluído que a cobertura com melhor desempenho para o edifício em questão seria a cobertura verde semi-intensiva. Relativamente à produção de energia com recurso a painéis solares fotovoltaicos, concluiu-se que, tendo em conta os três sistemas estudados, o sistema de 17.5 kWp seria o mais indicado sendo que 92% da energia produzida é autoconsumida, reduzindo em 47% o consumo de energia elétrica proveniente da rede.

Tendo em conta os resultados obtidos, para cada um dos dois sistemas considerados adequados para o edifício, um estudo económico simplificado permitiu concluir que o tempo de retorno é de 42 anos para o caso da coberturas verdes, e de aproximadamente 6 anos para o caso da produção de energia solar fotovoltaica.

Os resultados apresentados ao longo desta dissertação vêm comprovar a eficácia e benefícios associados aos sistemas apresentados. Posto isto, ficou ainda em aberto a possibilidade de aliar os benefícios associados a cada um deles, implementando o sistema de produção de energia solar conjuntamente com as coberturas verdes. Os sistemas de coberturas verdes têm a capacidade de amenizar a temperatura em seu redor através do processo de evapotranspiração fazendo com que, em dias de muito calor, a temperatura do painel seja reduzida. O resultado é um melhor desempenho do painel, contrariamente ao que acontece nas coberturas tradicionais com altos níveis de refletividade. Há ainda outros fatores a ter em conta como a inclinação do painel e a altura de vegetação de forma a que este sistema, já intitulado de “*solar green roof system*” pela (Green Roof Technology n. d.), possa ser corretamente dimensionado.

Referências Bibliográficas

Artigos Científicos, Publicações, Dissertações, Livros, Relatórios, Normas e Regulamentos

- Albuquerque, P.D., 2014. *Simulação Computacional de um Sistema de Ventilação Natural para uma Torre de Escritórios em Lisboa*. *Simulação Computacional de um Sistema de Ventilação Natural para uma Torre de Escritórios em Lisboa*.
- America, B. et al., 2015. Whole-Building Delivered Ventilation.
- Breu, F., Guggenbichler, S. & Wollmann, J., 2008. Energy Efficiency Trends in the EU. *Vasa*, (Intelligent Energy Europe Programme). Available at: <http://www.odyssee-indicators.org/publications/PDF/Overall-Indicator-brochure.pdf>.
- Cerón, I., Caamaño-Martín, E. & Neila, F.J., 2013. “State-of-the-art” of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, 58(OCTOBER), pp.127–133. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148113001225>.
- Cristina, D.M. et al., 2014. *Marcelo Ferreira da Rocha e Silva Júri*.
- Cudell, G., 2000. Manual de Instalação de Rega.
- DGEG, D.G. de E. e G., 2015. ENERGIA em Portugal - 2013.
- DOE, 2013. EnergyPlus Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.
- Emprego, M.D.E.E. Do, 2013. *Portaria n.º 349-D/2013*,
- Energia, P., 2004. Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação. , p.368.
- Ferreira, R., 2013. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Cálculo das Coberturas Jardim.
- Frankenstein, S., 2016. Fast All-Season Soil STrength (FASST) Cold Regions Research and Engineering Laboratory. , (January).
- Garrison, N. et al., 2012. Looking Up: how Green Roofs and Cool Roofs Can Reduce Energy Use , Address Climate Change , and Protect Water Resources in Southern California. *Nrdc Report*, R:12-06-B(June).
- Geologia, D.-G. de E. e, 2014. Estatísticas Rápidas - n.º 111. Available at: http://www.apisolar.pt/images/stories/dgeg_estatisticas_rapidas_jul14.pdf.
- Gonçalves, H. & Actual, S., 2010. Eficiência Energética nos Edifícios.
- Greater London Authority, 2008. Living Roofs and Walls- Technical Report: Supporting London Plan Policy. , p.60.
- Hertel, T.W., 2016. Food security under climate change. *Nature Clim. Change*, 6(1), pp.10–13. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2834>.
- Madlener, R. & Sunak, Y., 2011. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities and Society*, 1(1), pp.45–53. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670710000077>.
- Mahdiyar, A. et al., 2015. Investigating the Environmental Impacts of Green Roof Installation. *Jurnal Teknologi*, 76(1). Available at: <http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/3975>.
- Matias, C. A., 2006. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC
- Peck, S.W. et al., 1999. Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology

-
- diffusion. *Environment*, (March), p.78. Available at:
<http://ohio.sierraclub.org/miami/images/files/Greenbacks.pdf>.
- Pinto, C.I. da R.C., 2014. Introdução às Coberturas Ajardinadas.
- Rakotondramiarana, H., Ranaivoarisoa, T. & Morau, D., 2015. Dynamic Simulation of the Green Roofs Impact on Building Energy Performance, Case Study of Antananarivo, Madagascar. *Buildings*, 5(2), pp.497–520. Available at: <http://www.mdpi.com/2075-5309/5/2/497/>.
- Renewable, I. & Agency, E., 2015. Renewable Power Generation Costs in 2014. , (January).
- Renewables S.A., O., 2014. Open 2XX-PQ60 PT Data Sheet.
- La Roche, P. & Berardi, U., 2014. Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82(September 2015), pp.492–504. Available at:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814005957>.
- Sailor, D.J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), pp.1466–1478. Available at:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778808000339>.
- Silva, C.M., Gomes, M.G. & Silva, M., 2016. Green Roofs Energy Performance in Mediterranean Climate. *Energy and Buildings*. Available at:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816300123> [Accessed January 27, 2016].
- Sousa, J., 2012. O paradigma da eficiência energética dos edifícios. *Climatização - Edifícios e Energia*.
- Stater, D., 2011. Green Roofs: Sustainability from the top down. *Green Roofs: Sustainability from the top down*, p.37.
- TRANE, 2002. Commercial Building Pressurization. *TRANE engineers newsletter*, 31(2).
- Varela, A., 2011. A utilização de revestimentos de vegetação extensivos e intensivos em projecto de arquitectura paisagística em cobertura.

Sítios da Internet

- Arquitecologia*. s.d. <http://arquitecologia.org/Descs/CliFautl0.htm> (acedido em 21 de Junho de 2015).
- Bling Maps*. 2015.
<https://www.bing.com/maps/#Y3A9MzguNzMzNTAxfi05LjExOTcwMCZsdmw9NCZzdHk9ciZ3aGVyZTE9UnVhJTlwZmVybWZG8lMjBzZXF1ZWlyYSUyMGFndWlhcg==>
(acedido em 20 de Agosto de 2015).
- Building Energy Efficiency Policies* . 22 de Junho de 2015. <http://www.iea.org/beep/Portugal/>.
- Earth Observatory*. 2 de Agosto de 2006.
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=6800> (acedido em 20 de Agosto de 2015).
- EDP*. 2015.
<https://www.edp.pt/pt/particulares/bemvindoaedp/Pages/SimuladordePotenciaeConsumo.aspx>
(acedido em 20 de Setembro de 2015).
- European Commission* . s.d. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
(acedido em 20 de Julho de 2015).

-
- EVStudio*. 2014. <http://evstudio.com/green-roofs-%E2%80%93-drawbacks-and-benefits/> (acedido em 20 de Agosto de 2015).
- Green Roof Technology*. n. d. http://www.greenrooftechology.com/Solar_PV_Greenroofs.
- Growing Green Guide*. s.d. <http://www.growinggreenguide.org/technical-guide/construction-and-installation/green-roofs/> (acedido em 3 de Julho de 2015).
- IGRA*. s.d. <http://www.igra-world.com/index.php> (acedido em 16 de Julho de 2015).
- IteCons*. s.d. <http://www.itecons.uc.pt/index.php?module=inst&id=7> (acedido em 18 de Junho de 2015).
- Lopes, Augusto M. Tomaz. *Rio Maior - Câmara Municipal*. s.d. <http://www.cm-riomaior.pt/atividade-municipal/cultura/item/194-biblioteca-municipal> (acedido em 7 de Abril de 2015).
- Moita, Francisco. *ENERGIA SOLAR PASSIVA*. Lisboa: ARGUMENTUM, 2010.
- Neoturf*. 2015. <http://www.neoturf.pt/pt> (acedido em 23 de Julho de 2015).
- OCEAI's*. 23 de Maio de 2013. <http://www.oceai.org/apps/blog/green-white-green-roofs> (acedido em 9 de Outubro de 2015).
- PVEducation*. s.d. <http://pveducation.org/pvcdrom> (acedido em 2 de Setembro de 2015).
- World Watch*. s.d. <http://www.worldwatch.org/node/4752> (acedido em 15 de Junho de 2015).

Anexos

Anexo A – Descrição do modelo de Sailor (2008)

A descrição do modelo de Sailor (2008) é dividida entre o balanço de energia na folhagem e o balanço de energia no solo, onde são descritos o fluxo de calor latente e sensível. É importante esclarecer que existem equações e definições muito complexas que não estão descritas neste documento na sua totalidade. De realçar que o presente anexo foi realizado com recurso aos trabalhos de Sailor (2008) e Cristina et al. (2014). Para um maior esclarecimento, é sugerida a consulta de Frankenstein (2016) (Frankenstein 2016).

A1. Balanço de energia na folhagem

A equação A1 descreve o balanço de energia na folhagem. Esta inclui a absorção de radiação de comprimento de onda curta (solar) e de onda longa (calor e infravermelhos), emissão de radiação de onda longa e ainda o fluxo de calor sensível e latente.

$$F_f = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad [A.1]$$

onde:

F_f - Fluxo de calor na folhagem (W/m²)

σ_f - Fração da cobertura com vegetação. Esta é estimada a partir de LAI (Leaf Area Index, projeção da área de folhas por unidade de solo) como é demonstrado na equação A2. σ_f difere de LAI uma vez que esta apenas representa a percentagem de cobertura que está coberta por vegetação.

$$\sigma_f = 1 - \exp(-0.75 \times LAI) \quad [A.2]$$

I_s - Radiação total de comprimento de onda curta incidente (W/m²)

α_f - Albedo da folhagem (reflectancia de radiação de onda curta)

ε_f - Emissividade da folhagem

I_{ir} - Radiação total de comprimento de onda longa incidente (W/m²)

σ - Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x 10⁻⁸ W/(m²K⁴))

T_f - Temperatura da folhagem (K)

ε_g - Emissividade da superfície do solo

ε_1 - Relação entre a emissividade do solo e da folhagem ($\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$)

T_g - Temperatura da superfície do solo (K)

H_f - Fluxo de calor sensível da folhagem (W/m²)

L_f - Fluxo de calor latente da folhagem (W/m²)

Fluxo de calor sensível na folhagem

O fluxo de calor sensível na folhagem (H_f) é dado pela equação A3 e ocorre entre a superfície das folhas e o ar que se encontra na zona da folhagem sendo influenciado pela diferença de temperatura entre ambos, velocidade do vento e pelo parâmetro LAI.

$$H_f = (1.1LAI\rho_{af}C_{p,a}C_fW_{af})(T_{af} - T_f) \quad [A3]$$

em que:

LAI – Índice de área de folhas (Leaf Area Index) (m^2/m^2)

ρ_{af} – Densidade do ar à temperatura da folhagem (kg/m^3) – resulta da média entre a massa volúmica do ar (ρ_{ar}) e a massa volúmica do ar à temperatura das folhas (ρ_f), como é exemplificado na equação A4.

$$\rho_{af} = \frac{(\rho_a + \rho_f)}{2} \quad [A4]$$

$C_{p,a}$ - Calor específico do ar a pressão constante ($1005,6 J/(kg.K)$);

T_{af} - Temperatura do ar na zona da folhagem (K) – resulta da ponderação das temperaturas da envolvente da folhagem, ou seja, do ar (T_a), da folhagem (T_f) e do solo (T_g), calculada com recurso à equação A5.

$$T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g) \quad [A5]$$

C_f - Coeficiente de transferência de calor na folhagem, calculado com recurso à equação A6.

$$C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3}{W_{af}} \right) \quad [A6]$$

onde:

W_{af} - Velocidade do vento na zona da folhagem (m/s), por sua vez calculado usando a equação A7.

$$w_{af} = 0.83\sigma_f W \sqrt{C_{hnf}} + (1 - \sigma_f)W \quad [A7]$$

com:

W - Velocidade do vento do ficheiro climático (m/s) – existe um limite mínimo de 2,0 m/s, caso a velocidade do vento medida seja inferior a esta.

C_{hnf} - Coeficiente de transferência de calor na folhagem em condições atmosféricas quase neutras (Condições em que os movimentos de massas de ar estão limitados), calculado com recurso à equação A8.

$$C_{hnf} = K_v^2 \left(\ln \left(\frac{Z_a - Z_d}{Z_{o,f}} \right) \right)^{-2} \quad [A8]$$

em que:

K_v - Constante de von Karmen (0,4) – constante adimensional que descreve a velocidade de um fluido turbulento.

Z_a - Altura do instrumento de medição do vento (m).

Z_d - Deslocamento do plano zero (m) – escalar empírico para compensar o deslocamento vertical devido aos obstáculos da superfície, sendo definido pela equação A9, onde Z_f representa a altura da vegetação (m).

$$Z_d = 0.701Z_f^{0.979} \quad [A9]$$

$Z_{o,f}$ - Comprimento da rugosidade da folhagem (m) – Altura acima do solo onde a velocidade do vento é zero, sendo definida pela equação A10

$$Z_{o,f} = 0.131Z_f^{0.997} \quad [A10]$$

Da equação A3, pode-se reter que para valores elevados de LAI e W, e para uma vegetação mais alta o fluxo de energia na vegetação aumenta (uma vez que a velocidade do vento na zona da folhagem (W_{af}) depende de (W)). A constante 1.1 presente no início da equação A1 tem a função de aumentar o valor do calor sensível de modo a que se tenham em conta os ramos, tronco e planta. A parcela referente à convecção da folhagem é negativa ou positiva dependendo da diferença de temperaturas da folhagem e do ar na sua envolvente.

Fluxo de calor latente na folhagem

O fluxo de calor latente entre a folhagem e a atmosfera ao seu redor é dado pela equação A11.

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad [A11]$$

Este depende da velocidade do vento (W_{af}) definida na equação A7, da densidade do ar à temperatura da folhagem (ρ_{af}) definido na equação A4, do coeficiente de transferência de calor na folhagem (C_f) explicado pela equação A6, de LAI definido anteriormente e onde:

l_f - Calor latente de evaporação à temperatura da folhagem (J/kg) – representa a energia necessária para converter uma unidade de massa de água em vapor. Este termo é definido pela equação A12 sendo T_f a temperatura na folhagem.

$$l_f = 1.91846 \times 10^6 \left[\frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2 \quad [A12]$$

r'' – Teor de humidade na superfície das folhas – é dependente da resistência aerodinâmica e da resistência estomática, sendo definido pela equação A13.

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad [A13]$$

onde:

r_a - Resistência aerodinâmica para a difusão do vapor de água (s/m) – é sobretudo função da velocidade do vento na zona da folhagem, sendo dado pela equação A14. Quando a resistência aerodinâmica apresenta um valor baixo, a humidade presente na folhagem é quase nula secundo-as uma vez que se dá a evaporação da humidade. Por outro lado, para valores de resistência

elevados, a humidade relativa aumenta até um máximo de 1 viajando pela superfície das folhas e apresentando maiores dificuldades para evaporar.

$$r_a = \frac{1}{C_f W_{af}} \quad [A14]$$

r_s - Resistência estomática das folhas (s/m) – processo de perda de água da planta conhecido como transpiração. Ocorre principalmente nas folhas onde se localizam um maior número de estômatos que são as estruturas responsáveis pelas trocas gasosas da planta. Estas trocas ocorrem através da abertura e fecho destes, e a maior ou menor resistência a abertura destes é então denominada resistência estomática e traduzida pela equação A15.

$$r_s = \frac{r_{s,min}}{LAI} f_1 f_2 f_3 \quad [A15]$$

em que:

$r_{s,min}$ – Resistência estomática mínima da folha (m/s).

f_1 - Fator multiplicativo para o efeito da radiação solar na resistência estomática, definido na equação A16.

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[1, \frac{0.004 I_s + 0.005}{0.81(0.004 I_s + 1)} \right] \quad [A16]$$

onde:

f_2 - Fator multiplicativo para o efeito da humidade do solo na resistência estomática, definido na equação A17.

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0 & \text{quando } \theta_r > \bar{\theta} \\ \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r} & \text{quando } \theta_r \leq \bar{\theta} \leq \theta_{max} \end{cases} \quad [A17]$$

com:

$\bar{\theta}$ - Teor de humidade média do solo (m³/m³).

θ_r - Teor de humidade residual (humidade relativa do solo quando a planta começa a murchar) (m³/m³) – tipicamente tem um valor bastante baixo, na ordem dos 0,01 m³/m³.

θ_{max} - Teor de humidade máximo do solo (m³/m³) – tipicamente 0,5 m³/m³.

f_3 - Fator multiplicativo adicional para a resistência estomática, que se define com recurso à equação A18.

$$\frac{1}{f_3} = \exp[-g_d(e_{f,sat} - e_a)] \quad [A18]$$

onde:

g_d - Caraterística específica da planta relacionada com a resistência estomática – apenas tem valor considerável (que não zero) para alturas de planta significativas, nomeadamente árvores.

$e_{f,sat}$ - Pressão do vapor de ar saturado à temperatura da folha (Pa), calculado pela equação com humidade relativa (HR) igual a 1.

e_a - Pressão do vapor de ar (Pa).

Voltando à equação A11:

q_{af} - Razão de mistura do ar na zona da folhagem – representa a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco, definida pela equação A19.

$$q_{af} = \left[\frac{(1 - \sigma_f) + \sigma_f(0,3q_a + 0,6q_{f,sat}r'' + 0,1q_{g,sat}M_g)}{1 - \sigma_f[0,6(1 - r'') + 0,1(1 - M_g)]} \right] \quad [A19]$$

onde:

M_g - Índice de saturação de humidade do solo (variando entre 0 e 1) – 0 se estiver a chover, caso contrário, é igual ao índice de humidade do solo.

$q_{f,sat}$ - Razão de mistura saturada à temperatura da folhagem. É calculada com recurso à equação A20 com $HR = 1$ e mudando o índice “a” por “f”.

$q_{g,sat}$ - Razão de mistura saturada à temperatura da superfície do solo. É calculada com recurso à equação A20 com $HR = 1$ e mudando o índice “a” por “f”.

q_a - Razão de mistura do ar, avaliada pela equação A20, onde P_a corresponde à pressão atmosférica.

$$q_a = \frac{0,622e_a}{P_a - e_a} \quad [A20]$$

Posto isto, da equação A11 pode concluir-se que quanto maior for a temperatura da folhagem (maior valor de l_f) maior o valor de LAI. Quanto mais alta for a vegetação (Z_f) e a velocidade do vento (W), maior é o fluxo absorvido pela folhagem. Quanto menor a resistência estomática (r_s) relativamente à resistência aerodinâmica (r_a), maior é a humidade presente na folhagem (r'') e maior o fluxo na folhagem. A resistência estomática diminui com o aumento da radiação solar e com o aumento da humidade do solo.

A2. Balanço de Energia no solo

O fluxo de energia à superfície do solo é maioritariamente influenciado pelas propriedades térmicas do solo e pela percentagem de solo coberto (σ_f). O calor envolvido nas mudanças de estado físico da água presente no solo e o fluxo de calor devido ao transporte vertical de água no solo não são contabilizados. Este balanço de energia é dado pela equação A21.

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s(1 - a_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \times \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad [A21]$$

em que:

F_g - Fluxo de calor na superfície do solo (W/m^2).

a_g - Albedo da superfície do solo (reflectância à radiação solar).

H_g - Fluxo de calor sensível do solo (W/m^2).

L_g - Fluxo de calor latente do solo (W/m^2).

K - Condutibilidade térmica do solo (W/(m.K)).

z - Profundidade do solo (m).

À semelhança do balanço de energia na folhagem (A1) também a equação (A21) representa o fluxo de calor da radiação de onda curta e longa absorvida pelo solo, e a emissão de radiação de comprimento de onda longa. A última parcela representa a condução de calor para o interior do solo.

Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível ocorre entre a superfície do solo e o ar na zona da folhagem. Depende da diferença de temperatura entre estes bem como da velocidade do vento na zona da folhagem. É traduzido pela equação A22.

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_{hg} W_{af} (T_{af} - T_g) \quad [A22]$$

onde,

ρ_{ag} - Densidade do ar à temperatura da superfície do solo (kg/m³), estimada com recurso à equação A23, à semelhança da densidade do ar à temperatura da folhagem.

$$\rho_{ag} = \frac{(\rho_a + \rho_g)}{2} \quad [A23]$$

C_{hg} - Coeficiente de transferência de calor sensível no solo, obtido com recurso à equação A24.

$$C_{hg} = \Gamma_h [(1 - \sigma_f) C_{hng} + \sigma_f C_{hnf}] \quad [A24]$$

em que:

Γ_h - Fator de estabilidade atmosférica, definido pela equação A25.

$$\Gamma_h = \begin{cases} \frac{1.0}{(1.0 - 16.0 R_{ib})^{0.5}} & \text{para } R_{ib} < 0 \\ \frac{1.0}{(1.0 - 5.0 R_{ib})} & \text{para } R_{ib} > 0 \end{cases} \quad [A25]$$

onde,

R_{ib} - Número de Richardson - define se a atmosfera é estável ou instável. Condição que se define pelo sinal positivo ou negativo deste número, dado pela equação A26.

$$R_{ib} = \frac{2gZ_a(T_{af} - T_g)}{(T_{af} + T_g)W_{af}^2} \quad [A26]$$

com,

g - Aceleração da gravidade (9,8m/s²).

C_{hng} - Coeficiente de transferência no solo em condições atmosféricas quase neutras, dado pela equação A27.

$$C_{hng} = r_{ch}^{-1} \left[\frac{K_v}{\ln\left(\frac{Z_a}{Z_{o,g}}\right)} \right]^2 \quad [A27]$$

em que,

r_{ch} - Número de turbulência de Schmidt (0,63 para todos os tipos de solo), e usado para caracterizar fluxos de fluido.

$Z_{o,g}$ - Comprimento de rugosidade do solo (considerado 0,001m para todos os tipos de solo).

Da equação A22, é possível concluir que uma maior temperatura de solo em relação ao ar acima deste resulta na redução de absorção de calor por parte do mesmo. O fluxo aumentará para velocidades de vento superiores.

Fluxo de calor latente

A saída de vapor da superfície do solo depende da diferença entre a razão de humidade da superfície do solo e do ar na zona da folhagem, e depende também da velocidade do vento na zona da folhagem. O fluxo de calor latente no solo é dado pela equação A28.

$$L_g = C_{hg} l_g W_{af} \rho_{ag} (q_{af} - q_g) \quad [A28]$$

com,

l_g – Calor latente de vaporização à temperatura da superfície do solo, definido pela equação A29.

$$l_g = 1.91846 \times 10^6 \left[\frac{T_g}{T_g - 33.91} \right]^2 \quad [A29]$$

q_g - Razão de mistura à temperatura da superfície do solo dado pela equação A30.

$$q_g = M_g q_{g,sat} + (1 - M_g) q_{af} \quad [A30]$$

Pode concluir-se através da equação A28 que para uma maior razão de humidade no solo comparativamente com o ar na zona da folhagem, menor será o fluxo de calor absorvido por este pois existe evaporação da água.

A3. Equações finais do solo e da folhagem

Nesta fase, com exceção das temperaturas do solo (T_g) e da folhagem (T_f) todos os parâmetros foram já definidos. Para as determiná-los, o método será igualar os fluxos de calor respetivos a cada uma delas a zero, revelando a existência de um equilíbrio de fluxo de energia como é demonstrado nas equações A31 e A32 para a folhagem e para o solo respetivamente.

$$F_f(T_f) = 0 = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad [A32]$$

$$F_g(T_g) = 0 = (1 - \sigma_f) [I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \times \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad [A33]$$

O EnergyPlus funciona por passos de tempo necessitando destes dados para chegar a resultados fiáveis no espaço de tempo que se pretende (Warm up). As equações finais deste modelo são bastante complexas e não se irão descrever aqui, contudo, são geradas a partir das equações definidas para os dois fluxos de calor.

Anexo B – Características da envolvente do edifício da BMLS

B.1 Planta original do edifício

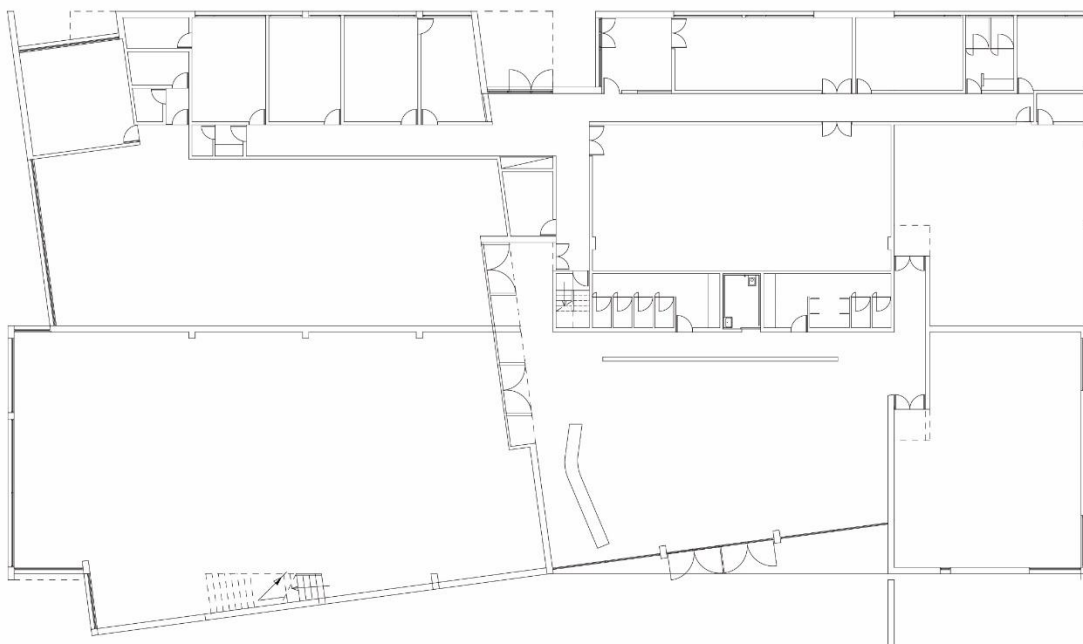


Figura 52 - Planta original do edifício da Biblioteca Municipal Laureano Santos

B.2 Planta original do edifício

Descrição dos materiais que compõem cada uma das superfícies da envolvente. Os materiais são apresentados do exterior para o interior do elemento. Fontes: (Matias 2006) (Moita 2010).

Paredes exteriores

W01					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Pedra Cálcea Branca	0.02	1.10	1700	1000	0.02
Assentamento	0.02	1.30	1800	1044	0.01
Alvernaria de Tijolo	0.11	0.77	1900	407	0.14
Caixa de Ar	0.04	0	1.2	0	0.18
Isolamento Térmico	0.03	0.04	35	1260	0.81
Alvernaria de Tijolo	0.10	0.77	1900	407	0.12
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.32
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.46
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.68

W02					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Alvernaria de tijolo	0.10	0.77	1900	407	0.12
Isolamento térmico	0.03	0.04	35	1260	0.81
Caixa de ar	0.04	0	1.2	0	0.18
Alvernaria de tijolo	0.11	0.77	1900	407	0.14
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.30
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.44
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.69

W03					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Alvernaria de tijolo	0.11	0.77	1900	407	0.14
Caixa de Ar	0.04	0	1.2	0	0.18
Alvernaria de tijolo	0.11	0.77	1900	407	0.14
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.28
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.65
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					1.54

W04					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.03	1.30	1800	1044	0.02
Betão (B25)	0.28	2	2100	972	0.14
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.32
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.34
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					2.95

W05					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Betão (B25)	0.29	2	2100	972	0.14
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.31
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.33
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					3.05

W06					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Betão (B25)	0.18	2	2100	972	0.09
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.20
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.28
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					3.63

Paredes interiores

W07					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Madeira de tola	0.02	0.15	520	1044	0.12
Reboco	0.01	1.30	1800	407	0.01
Alvernaria de tijolo	0.16	0.77	1900	1044	0.21
Reboco	0.01	1.30	1800	2102	0.01
Espessura total (m)					0.20
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.60
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					1.66

W08					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Assentamento	0.015	1.3	1800	1044	0.01
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Alvernaria de tijolo	0.11	0.77	1900	407	0.18
Reboco	0.01	0.77	1800	1044	0.01
Assentamento	0.015	1.3	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.16
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.48
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					2.07

W09					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Alvernaria de tijolo	0.16	0.77	1900	407	0.21
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.18
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.48
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					2.07

W10					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.04	1.3	1800	1044	0.03
Betão (B25)	0.30	2	2100	972	0.15
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.35
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.44
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					2.25

W11					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Alvernaria de tijolo	0.13	0.77	1900	407	0.17
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.15
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.44
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					2.25

W12					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Betão (B25)	0.30	2	2100	972	0.15
Reboco	0.01	1.3	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.32
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.43
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					2.35

Coberturas

R01					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Areão	0.016	2.00	2100	1000	0.01
Isolamento térmico	0.030	0.04	35	1260	0.81
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Emulsão betuminosa	0.002	0.17	1100	1188	0.01
Camada de forma	0.030	0.85	1500	1000	0.04
Betão (B25)	0.260	2.00	2100	972	0.13
Reboco	0.010	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.35
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.31
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.76

R02					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Pav cerâmico S.Paulo	0.010	1.20	2000	936	0.01
Assentamento	0.015	1.30	1800	1044	0.01
Isolamento térmico	0.030	0.04	35	1260	0.81
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Emulsão betuminosa	0.002	0.17	1100	1188	0.01
Camada de forma	0.030	0.85	1500	1000	0.04
Reboco	0.010	1.30	1800	1044	0.01
Betão (B25)	0.200	2.00	2100	972	0.10
Reboco	0.010	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.31
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.30
Coefficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.77

R03					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Areão	0.016	2.00	2100	1000	0.01
Isolamento Térmico	0.03	0.04	35	1260	0.81
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Emulsão Betuminosa	0.002	0.17	1100	1188	0.01
Camada de Forma	0.03	0.85	1500	1000	0.04
Betão (B25)	0.2	2.00	2100	972	0.10
Reboco	0.01	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.30
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.28
Coefficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.78

R04					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Especifico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Pav Cerâmico S.Paulo	0.010	1.20	2000	936	0.01
Assentamento	0.015	1.30	1800	1044	0.01
Isolamento Térmico	0.030	0.04	35	1260	0.81
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Telas de impermeabilização	0.003	0.06	1000	1296	0.05
Emulsão Betuminosa	0.002	0.17	1100	1188	0.01
Reboco	0.010	1.30	1800	1044	0.01
Betão (B25)	0.200	2.00	2100	972	0.10
Reboco	0.010	1.30	1800	1044	0.01
Espessura total (m)					0.28
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.26
Coefficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.79

R05					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor Específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Capeamento zinco	0.065	110.00	7200	446	0.001
Isolamento térmico	0.030	0.04	35	1260	0.811
Emulsão betuminosa	0.002	0.17	1100	1188	0.009
Betão (B25)	0.300	2.00	2100	972	0.150
Reboco	0.010	1.30	1800	1044	0.008
Espessura total (m)					0.40
Resistência térmica total (m².°C/W)					1.19
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					0.84

Pavimentos

F01					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Betão (B25)	0.20	2	2100	972	0.10
Madeira de Tola	0.05	0.15	520	2102	0.33
Pav. Flutuante de Tally	0.01	0.29	900	1000	0.03
Espessura total (m)					0.26
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.61
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					1.65

F02					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Betão (B25)	0.200	2	2100	972	0.10
Assentamento	0.050	0.15	520	2102	0.33
Pav. Borracha	0.002	0.13	1100	1656	0.02
Espessura total (m)					0.25
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.59
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					1.70

F03					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Betão (B25)	0.20	2	2100	972	0.10
Assentamento	0.05	1.3	1800	1044	0.04
Pedra Calcária Amaciada	0.03	1.1	1700	1000	0.03
Espessura total (m)					0.28
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.31
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					3.27

F04					
Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistência térmica (m².°C/W)
Betão (B25)	0.20	2	2100	972	0.10
Assentamento	0.05	1.3	1800	1044	0.04
Pav. Cerâmico S.Paulo	0.01	1.2	2000	936	0.01
Espessura total (m)					0.26
Resistência térmica total (m².°C/W)					0.29
Coeficiente de Transmissão térmica total (W/m².°C)					3.49

Envidraçados

V01						
Material	Espessura (m)	Espessura total (m)	Factor solar (%)	Factor solar total (%)	Coeficiente de transmissão térmica (W/m².°C)	Coeficiente de transmissão térmica total (J/kg.K)
SGG COOL-LITE KNT155	0.008	0.03	0.49	0.39	5.62	2.72
Ar	0.010		0		0	
SGG PLANILUX	0.008		0.83		5.73	

V02						
Material	Espessura (m)	Espessura total (m)	Factor solar (%)	Factor solar total (%)	Coeficiente de transmissão térmica (W/m².°C)	Coeficiente de transmissão térmica total (J/kg.K)
SGG COOL-LITE KNT155	0.006	0.022	0.51	5.68	2.74	0.42
Ar	0.010		0	0		
SGG PLANILUX	0.006		0.85	5.80		

V03						
Material	Espessura (m)	Espessura total (m)	Factor solar (%)	Factor solar total (%)	Coeficiente de transmissão térmica (W/m².°C)	Coeficiente de transmissão térmica total (J/kg.K)
SGG COOL-LITE KNT155	0.008	0.033	0.23	5.66	2.53	0.13
Ar	0.012		0	0		
SGG PLANILUX	0.013		0.76	5.25		

Anexo C – Produção e consumo fotovoltaico

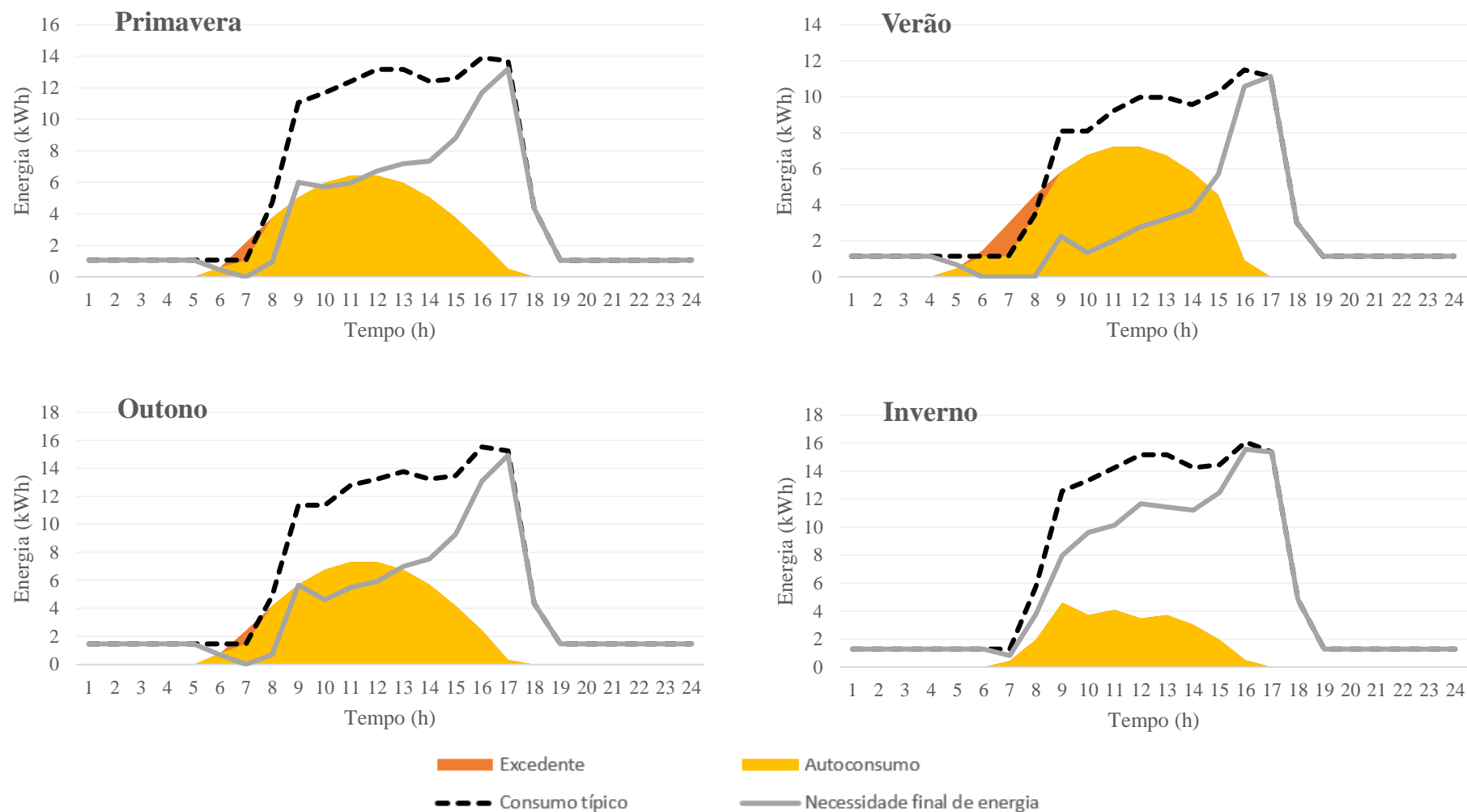


Figura 53 - Consumo típico, necessidade final de energia, excedente e autoconsumo de energia após a instalação de um sistema de 11.5 kWp em cada uma das quatro estações.

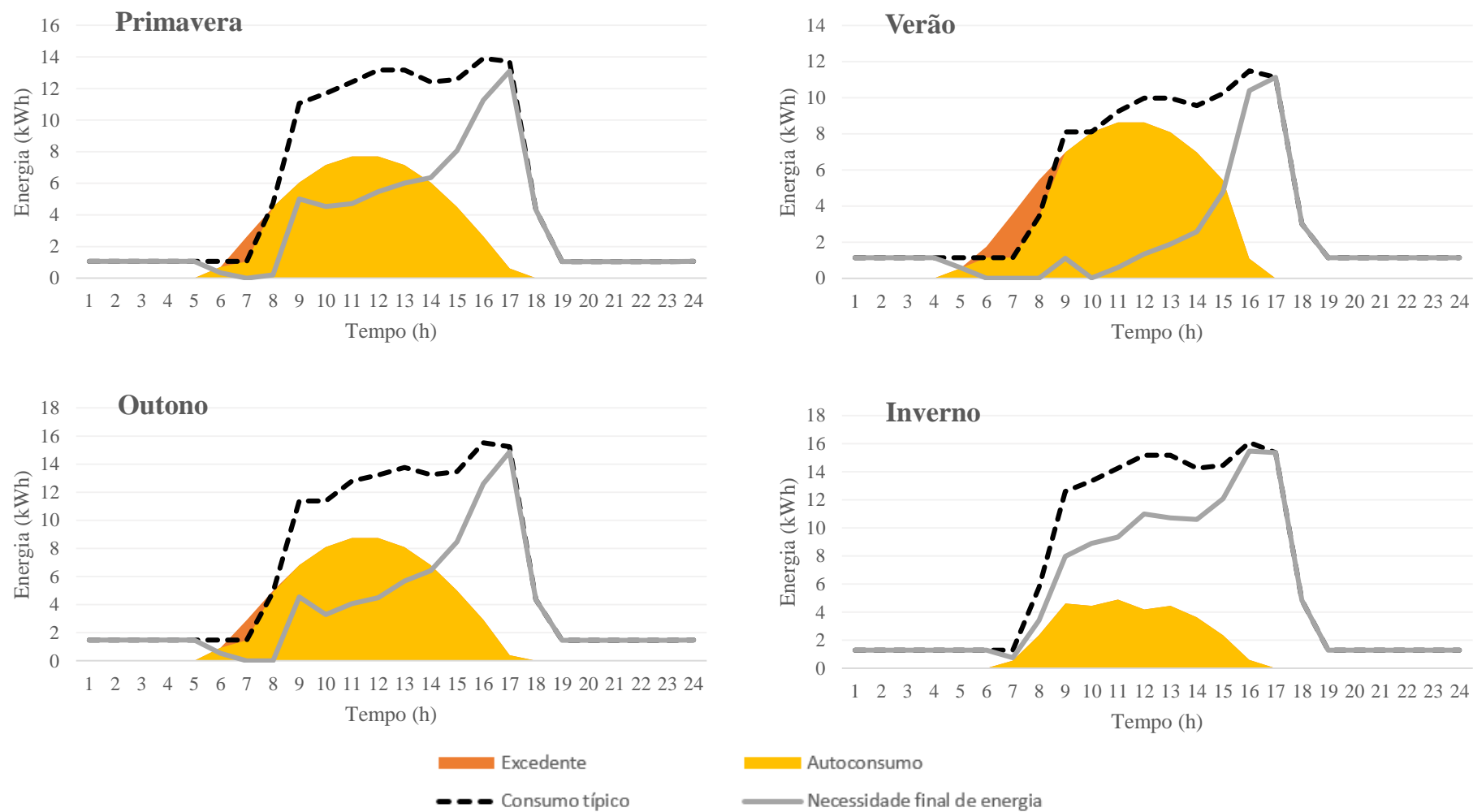


Figura 54 - - Consumo típico, necessidade final de energia, excedente e autoconsumo de energia após a instalação de um sistema de 13.75 kWp em cada uma das quatro estações